

VSB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a  
informatiky

Diplomová práce

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

Návrh měřicího transformátoru proudu vn  
Design of current transformer

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Ošlejšek**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika  
Téma: **Návrh měřicího transformátoru proudu vn.  
Design of current transformer**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte teoretický rozbor činnosti MTP a proudového snímače.
2. Navrhněte MTP na napětí 25 kV a jmenovitý primární proud 1250 A ve vnitřním provedení s epoxidovou izolací a parametry: měřicí část n=5 TP 0,5% a jistící část 15P5.
3. Vypočítejte dovolené pole chyb a požadovanou korekci.
4. Rozeberte dosažené výsledky a výhody MTP a PS z hlediska praktického nasazení.

Seznam doporučené odborné literatury:


Král,J.,Vaněk,J.: Elektromagnetické přístroje, Brno, VUT 1984  
Kopeček,J.,Dvořák,M.: Přístrojové transformátory měřicí a jistící, Praha, Academia 1963  
Katalog firmy ABB

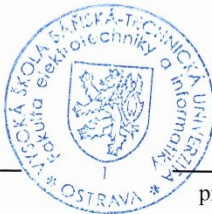
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

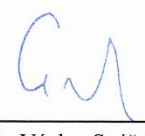
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Hytka, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 29.04.2016

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

**Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V BLANSKU 27.4.2016

Místo a datum



Podpis  
Jiří Ošlejšek

## **Abstrakt**

Úkolem této diplomové práce je výpočet měřicího a jistícího transformátoru proudu. Vypočítaný transformátor je složen z dvou magnetických obvodů. Vlastní práce se skládá z několika částí. První část je věnována popisu základních pojmů. Další část obsahuje seznámení se základními veličinami a dovolenými chybami transformátorů proudu. V části teoretického výpočtu je nastíněn postup výpočtu transformátoru proudu. Dalším úkolem této práce je porovnat transformátory proudu s moderními snímači proudu. Jako je například Hallova sonda a Rogowského cívka. K porovnání využiji průmyslově vyráběné snímače proudu.

## **Klíčová slova**

Měřicí transformátor proudu, jistící transformátor proudu, magnetický obvod, snímač proudu, Hallova sonda, Rogowského cívka.

## **Abstrakt**

The objective of the Diploma Thesis is calculation of measuring and protective current transformer. The calculated transformer consists of two magnetic circuits. The Thesis is divided into several parts. The first part deals with basic terms description. The following part works with basic quantities and permissible current transformer tolerances. The theoretical calculation part describes the current transformer calculation methodology. Further objective of the Thesis is to compare current transformers with modern current sensors, e.g. Hall probe and Rogowski coil. Commercially produced current sensors will be used for the purpose of the comparison..

## **Keywords**

Measuring current transformer, protective current transformer, magnetic circuit, current sensor, Hall probe, Rogowski coil.

## Seznam použitých symbolů a zkratk

$U_1$	napětí na vstupních svorkách, napětí primárního vinutí	V
$U_2$	napětí na výstupních svorkách, napětí sekundárního vinutí	V
$R_1$	odpor vstupního vinutí	$\Omega$
$R_2$	odpor výstupního vinutí	$\Omega$
$L_1$	indukčnost primárního vinutí	H
$L_2$	indukčnost sekundárního vinutí	H
$M$	vzájemná indukčnost obou vinutí	H
$I_1$	primární proud	A
$I_2$	sekundární proud	A
$\omega$	úhlová frekvence	$s^{-1}$
$X_m$	magnetizační reaktance	$\Omega$
$I_m$	magnetizační proud	A
$U_0$	vnitřní napětí transformátoru	V
$\phi_1$	celkový magnetický tok (vstupního vinutí)	Wb
$\phi_2$	celkový magnetický tok (výstupního vinutí)	Wb
$\phi$	magnetický tok uvnitř jádra	Wb
$\phi_{r1}$	rozptylový tok vstupního vinutí	Wb
$\phi_{r2}$	rozptylový tok výstupního vinutí	Wb
$\lambda$	magnetická vodivost dráhy toku	H
$\lambda_{r1}$	magnetická vodivost dráhy toku pro rozptylový tok vstupní	H
$\lambda_{r2}$	magnetická vodivost dráhy toku pro rozptylový tok výstupní	H
$\lambda_1$	magnetická vodivost dráhy toku pro vstupní vinutí	H
$\lambda_2$	magnetická vodivost dráhy toku pro výstupní vinutí	H
$L_{r1}$	rozptylová indukčnost vstupního vinutí	H
$L_{r2}$	rozptylová indukčnost výstupního vinutí	H
$X_1$	rozptylová vstupní reaktance	$\Omega$
$X_2$	rozptylová výstupní reaktance	$\Omega$
$N_1$	počet závitů vstupního vinutí (primárního vinutí)	-
$N_2$	počet závitů výstupního vinutí (sekundárního vinutí)	-
$p$	převodový poměr	-
$P_1$	vstupní výkon	VA
$P_2$	výstupní výkon	VA

$U'_1$	hodnota primárního napětí, převedená na výstupní stranu (sekundární stranu)	V
$U'_2$	hodnota sekundárního napětí, převedená na vstupní stranu (primární stranu stranu)	V
$I'_1$	hodnota primárního proudu, převedená na výstupní stranu (sekundární stranu)	A
$I'_2$	hodnota sekundárního proudu, převedená na vstupní stranu (primární stranu stranu)	A
$R'_1$	hodnota odporu primar. vinutí, převedená na výstupní stranu (sekundární stranu)	$\Omega$
$R'_2$	hodnota odporu sekun. vinutí, převedená na vstupní stranu (primární stranu stranu)	$\Omega$
$I_{1n}$	jmenovitý primární proud	A
$I_{2n}$	jmenovitý sekundární proud	A
$I_{1m}$	krajní provozní proud	A
$Z$	vnější břemeno transformátoru proudu	$\Omega$
$Z_i$	vnitřní břemeno transformátoru proudu	$\Omega$
$Z_c$	celkové břemeno transformátoru proudu	$\Omega$
$Z_n$	jmenovité břemeno transformátoru proudu	$\Omega$
$P$	zátěž transformátoru proudu	VA
$P_n$	jmenovitá zátěž transformátoru	VA
$\cos \beta$	sekundární účinník transformátoru proudu	-
$k_i$	jmenovitý převod transformátoru proudu	-
$\varepsilon_i$	chyba proudu	%
$\vartheta_i$	chyba úhlu	min
$n$	nadproudové číslo	-
$n_n$	jmenovité nadproudové číslo TP	-
$N_2^k$	počet závitů sekundárního vinutí po korekci	-
$I_2'$	hodnota rozděleného proudu při korekci chyby (dělení jádra na dvě části)	A
$I_2''$	hodnota rozděleného proudu při korekci chyby (dělení jádra na dvě části)	A
$N_1'$	hodnota počtu závitů při korekci chyby (dělení jádra na dvě části)	-
$N_2'$	hodnota počtu závitů při korekci chyby (dělení jádra na dvě části)	-
$U_2$	hodnota výstupního napětí při korekci chyby (dělení jádra na dvě části)	V
$U_2''$	hodnota výstupního napětí při korekci chyby (dělení jádra na dvě části)	V
$T_p$	třída přesnosti	-
$F_l$	jmenovité proudění	Az
$S_1$	průřez primární ho vodiče	m <sup>2</sup>
$\sigma_{thn}$	proudová hustota	A/mm <sup>2</sup>
$I_{thn}$	jmenovitý krátkodobý proud	kA



$T_z$	zkratová třída	-
$t_i$	tloušťka izolačního předělu	mm
$B_m$	maximální magnetická indukce	T
$B_n$	jmenovitá magnetická indukce	T
$S'$	předběžná hodnota průřezu jádra	m <sup>2</sup>
$S$	hodnota průřezu jádra	m <sup>2</sup>
$h$	výška jádra	m
$b$	šířka jádra	m
$H$	výška zapouzdřeného jádra	m
$B$	šířka zapouzdřeného jádra	m
$S_{1N}$	průřez primárního vodiče	m <sup>2</sup>
$S_{Cu}$	průřez na provlečení primárních vodiče	m <sup>2</sup>
$D'_{1i}$	průměru kruhového průřezu	m
$D'_{3i}$	vnitřní průměr pouzdra	m
$D'_{2i}$	vnitřní průměr transformátoru ( s izolací)	m
$n_2$	počet vrstev sekundárního vinutí	-
$t_2$	výšku sekundárního vinutí	m
$D'_i$	vnitřní průměr jádra	m
$D_e$	vnější průměr jádra	m
$D$	střední průměr jádra	m
$s$	přídavek na pouzdro jádra (3,5-5mm)	m
$r$	přídavek na pouzdro jádra (3,5-5mm)	m
$l_2$	střední délky závitu sekundárního vinutí	m
$\rho$	měrný odpor materiálu	$\Omega \cdot m^2 \cdot m^{-1}$
$P_i$	vnitřní zátěže	VA
$P_n$	zátěž jmenovitého břemene	VA
$P_{\xi}$	činné složky jmenovité zátěže	VA
$P_j$	jalové složky jmenovité zátěže	VA
$P_c$	celková zátěž transformátoru při jmenovitém proudu	VA
$Z_n$	jmenovité břemeno	$\Omega$
$B_{sk}$	hodnota jmenovité magnetické indukce (při daném zatížení)	T
$n_{sk}$	kontroly nadproudového čísla	-
$a_0$	měrné budící proudění	A/m

$a_g$	činný měrné budící proudění	A/m
$a_b$	jalové měrné budící proudění	A/m
$\cos \gamma$	úhel $\gamma$	-
$tg \beta_c$	úhel $\beta_c$	-
$\alpha$	úhel $\alpha$	-
$I_{20}$	celková chyba transformátoru proudu	A
$l_m$	střední délky magnetického obvodu	m
$U_H$	Hallovo napětí	V
$k$	konstanta (závislá na materiál, tloušťce a struktuře polovodičové destičky)	-
$I$	stejnoseměrný proud (protékající polovodičovou destičkou)	A
$B$	indukce magnetického pole (které prochází destičkou)	T
$\pi$	konstanta (3,14)	-
$\mu_0$	relativní permeabilita vakua	H/m
$d^2$	průměr Rogowského cívky	m
MTP	měřicí transformátor proudu	
TP	transformátor proudu	

## Obsah

1. Úvod	1
2. Základní pojmy	2
2.1 Základní provedení transformátorů proudu	4
2.2 Transformátor všeobecně	7
2.3 Základní převody a přepočty	10
2.4 Základní stavy transformátorů	12
3. Teoretický výpočet	13
3.1 Základní konstrukční parametry	13
3.2 Dovolené chyby měřících transformátorů proudu	15
3.3 Dovolené chyby jistících transformátorů proudu	16
3.4 Nadproudové oblasti	17
3.4 Závitová korekce	19
4. Postup výpočtu TP	22
4.1 Výpočet závitů	22
4.2 Izolace z epoxidu	23
4.3 Výpočet jádra transformátoru	24
4.4 Kontrola proudové a úhlové chyby transformátoru	27
4.5 Výpočet chyby proudu a chyby úhlu	32
5. Výpočet	34
5.1 Vypočítané hodnoty	35
5.1.1 Vypočítané hodnoty transformátoru – měřící část	35
5.1.2 Vypočítané hodnoty transformátoru – jistící část	37
5.2 Výpočet pole chyb a požadované korekce	38
6. Snímače proudu	39
6.1 Hallova sonda	39
6.1.1 Princip činnosti Hallovy sondy	39
6.1.2 Průmyslově vyráběné snímače s Hallovou sondou	39
6.1.3 Výrobky s využitím Hallovy sondy	42
6.1.4 Shrnutí poznatků	45
6.2 Rogowského cívka	46
6.2.1 Princip činnosti Rogowského cívky	46
6.2.2 Průmyslově vyráběné snímače s Rogowského cívkou	47

6.1.3 Výrobky s využitím Rogowského cívky	48
6.2.4 Shrnutí poznatků	50
7. Závěr	51
Použitá literatura	52

## 1. Úvod

Měřicí transformátory proudu mají v oblasti výroby, přenosu i distribuce svoje nezastupitelné místo. Mezi hlavní výhody patří jejich přesnost, životnost a pořizovací náklady, které udržují MTP pořád ve vývoji. Prakticky je možné říci, že měřicí transformátory z hlediska principu jsou od počátku 50. let beze změny stejné. Ale s postupným vývojem nových izolačních a feromagnetických materiálů se vývoj neustále posouvá kupředu. Z hlediska popsaných výhod se domnívám, že MTP budou vždy zajímavé a žádané. Proto v této práci provedu teoretický rozbor a výpočet vzorového MTP. A poté porovnáím velikosti nepřesností s moderními snímači proudu.

Porovnávané snímače proudu budou Hallovy sondy a Rogowského cívka. S postupným snižováním ceny mikroprocesorů a A/D převodníků, je pravděpodobný vzrůstající trend tímto směrem. Proto je součástí této práce porovnat výhody a nevýhody všech vyjmenovaných měřících zařízení.

## 2. Základní pojmy

Použité informace a literatura v této práci, byly založeny na normě ČSN 35 1360. Tato norma je již neplatná a nebyla nahrazena novou českou normou. Norma byla platná od roku 1977 (leden) až do roku 2010 (květen). Na její místo byla přijata mezinárodní norma IEC 61869, která by měla upravovat a sjednocovat mezinárodní parametry v tomto odvětví.

V roce 2010 (červnu) byla nahrazena původní norma IEC 60044 za novou normu IEC 61869. Hlavní rozdíly mezi původní a novou normou je úprava a doplnění o elektronické transformátory a senzory, které se objevily na trhu a původní normy je neobsahovaly v požadovaném rozsahu. Pro doplnění uvádím materiál [12], který obsahuje ve zkratce popis této normy a její rozdíly.

Vlastní výpočet transformátoru zůstává stejný, a proto v práci využiji materiálů [1][2], které vycházejí ze staré normy a za případný rozdíl od nové normy se omlouvám.

### Rozdělení přístrojových transformátorů

„Přístrojové transformátory můžeme rozdělit podle několika hledisek. Uvedeme si jen nejběžnější rozdělení:

a) Podle transformované veličiny

-transformátory proudu

-transformátory napětí

-transformátory kombinované

b) Podle funkce

-transformátory měřicí

-transformátory jistící

c) Podle umístění

-transformátory pro vnitřní montáž

-transformátory pro venkovní montáž

Dále můžeme přístrojové transformátory dělit podle druhu izolace (vzduchové, olejové, epoxidové atd.), podle montáže a podle převodu.“[2]

### Jmenovité proudy

Jmenovité proudy dělíme na primární proudy a sekundární proudy. Primární proudy se pohybují od 5 A až po 20 000 A ( uvádí se až hodnota 80 000 A [2] ). Sekundární proud je v hodnotách 1 A , 5 A. Ale občas se setkáme i s hodnotou 10 A. Volba sekundárního proudu je závislá hlavně na požadavcích zákazníka, ale dá se říci, že pro MTP je do hodnoty primárního proudu 200 A volen sekundární proud 1 A. Nad tuto hodnotu primárního proudu se volí sekundární proud 5 A a při primárních proudech nad 4000 A se volí sekundární proud 10 A.

### Měřicí a jistící transformátor

V případě nutnosti sloučení měřicí a jistící části MTP je možné použít dvou sekundárních vinutí na jednom jádře. Tím získáme zvýšení efektivity výroby, bez nutnosti použití dvou samostatných transformátorů nebo použijeme dvou samostatných jader transformátorů. Tento problém bude probrán v práci v jedné podkapitole, protože je součástí této práce návrh měřicího a jistícího transformátoru proudu.

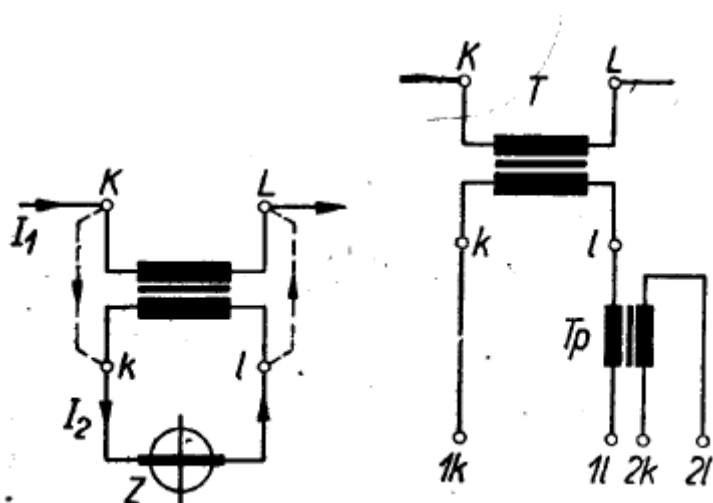
### Značení svorek

Primární a sekundární svorky se z důvodu možné zaměnitelnosti označují specifickými písmeny, aby nebylo možné je zaměnit. V případě záměny by došlo k poškození transformátor a měřicího obvodu.

Měřicí transformátor proudu – MTP:

Vstupní svorky primárního vinutí: K, L

Výstupní svorky sekundárního vinutí: k, l



Obr. 1 Schéma zapojení MTP [1] Obr.2 Schéma zapojení MTP s dvěma sekundárními vynutími [1]

V případě více sekundárních vinutí se tyto vinutí označují 1k, 1l ;2k, 2l

Měřicí transformátor napětí – MTN:

Transformátory napětí jednofázové dvoupólově izolované

Vstupní svorky primárního vinutí: M, N

Výstupní svorky sekundárního vinutí: m, n

Transformátory napětí jednofázové jednopólově izolované

Vstupní svorky primárního vinutí: M, O

Výstupní svorky sekundárního vinutí: m, o

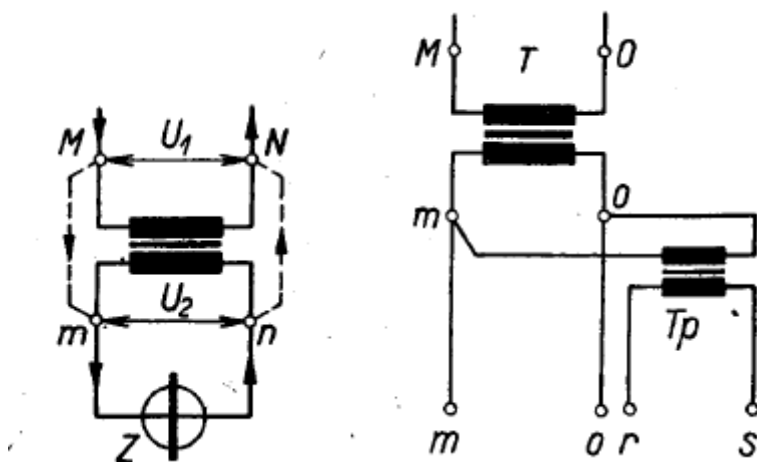
Transformátor napětí třífázový

Vstupní svorky primárního vinutí: A, B, C

Výstupní svorky sekundárního vinutí: a, b, c

Pomocné vinutí

Svorky se označují: r, s



Obr. 3 Schéma zapojení MTN[1] Obr. 4 Schéma zapojení MTN s pomocným vinutím[1]

## 2.1 Základní provedení transformátorů proudu

Transformátory dělíme podle primárního vinutí na jednozávitové a závitové. S pomocí tab. 1, tab. 2 a tab. 3 je možné jednoduše sestavit popis transformátoru. Tyto údaje se hodí hlavně pro skladníky a montážní dělníky, kteří s tímto jednoduchým popisem mohou lehce nalézt daný transformátor. Popis obsahuje provedení transformátoru, typ izolace, způsob montáže a provedení. Provedení je vnitřní ( B ) anebo venkovní ( V ). Dále je možné nahradit poslední znak písmenem. Tento popis ovlivňuje polohu ( viz tab. 3 ).






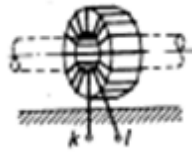
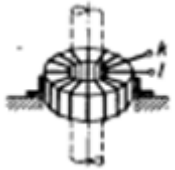
Příklad použití:

PPB○ - ( PPBO ) = Podpěrný transformátor proudu s porcelánovou izolací, pro vnitřní provedení a libovolnou montáž.

IZV⊥ - IZVL = Prstencový transformátor zalitý v epoxidové izolaci, pro venkovní použití s montáží pro postavení.

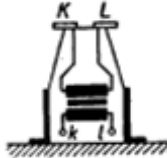
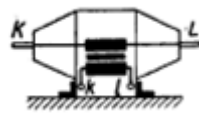
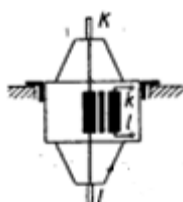
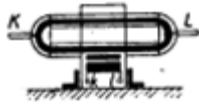
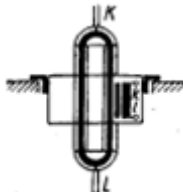


# Jednozávitové transformátory

Název	Ozna- čení	Popis	Tvar	
Podpěrný	P	Transformátor proudu s primárními svorkami na temeni izolačního tělesa, spodek izolačního tělesa je uchycen v uzemněném rámu nebo nádobě. Transformátor může zastávat funkci podpěrky.		
			Průchozí	Průchodkový
Tyčový	T	Transformátor proudu s vestavěným vodičem primárního vinutí ve tvaru tyče nebo pásu. Primární vodič je u vysokého napětí izolován průchodkou.		
Násuvný	I	Transformátor proudu bez vestavěného primárního vodiče. Transformátor je vybaven jen magnetickým obvodem s navinutým sekundárním vinutím; nasouvá se na přípojnici nebo na průchodku.		
Prstencový	I	Transformátor proudu s magnetickým obvodem tvaru prstence, na němž bývá sekundární vinutí rozloženo rovnoměrně po celém obvodu. Transformátor je bez vestavěného primárního vinutí; využívá se jako násuvný.		


Tab. 1 Tvar přístrojových transformátorů proudu (jednozávitové) [1]

# Závitové transformátory

Název	Označení	Popis	Tvar
Podpěrný	P	Transformátor proudu s primárními svorkami na temeni isolačního tělesa, spodek isolačního tělesa je uchycen v uzemněném rámu nebo nádobě. Transformátor v tomto provedení může zastávat funkci podpěrky.	
Průchozí	S	Transformátor proudu s primárními svorkami na opačných stranách podélného isolačního tělesa. Uprostřed je uzemněný rám pro připevnění transformátoru.	
Průchodkový	S	Transformátor průchozí užitý současně jako průchodka.	
Smyčkový (průchozí)	S	Transformátor průchozí nebo průchodkový, u něhož je primární vinutí při průchodu uzemněným rámem a magnetickým obvodem izolováno dvěma průchodkami.	
Smyčkový (průchodkový)	S		

Tab. 2 Tvar přístrojových transformátorů proudu (závitových) [1]

Rozdělení podle typu izolace a typu montáže

Druh izolace	Označení	Způsob montáže	Označení	
			na štítku	v písem. stylu
Vzduchová	V	pro postavení		L
Olejová	O	pro zavěšení		T
Zalitá	Z	poloha vodorovná		H
Porcelánová	P	poloha libovolná		O
jiná	U			

Tab. 3 Rozdělení přístrojových transformátorů podle izolace a podle montáže [1]

## 2.2 Transformátor všeobecně

„Transformátor je netočivý elektrický stroj, který přeměňuje přivedené napětí a proud na jiné zvolené hodnoty. Při této přeměně zůstává výkon nezměněn (pokud nepřihlížíme ke ztrátám v samotném transformátoru).“ [2]

Transformátory se vyrábějí jako jednofázové a třífázové. S výkony pohybujícími se v rozmezí několika VA až několika set MVA. Transformátory s malým výkonem reprezentují měřicí transformátory, sdělovací transformátory a malé napájecí transformátory. Střední oblast zaplňují speciální transformátory pro galvanické pokovení, svařovací transformátory a zkušební transformátory. Mezi nejvýkonnější zařazujeme přenosové a distribuční transformátory.

### Všeobecná rovnice transformátoru a náhradní schéma

„Transformátor je vlastně prvek elektrického obvodu se dvěma nebo více vynutími, která jsou spolu magneticky vázána. Pro začátek budeme uvažovat transformátor se dvěma vinutími (vstupní a výstupní) se stejným počtem závitů ( $N_1=N_2$ ). „ [2]

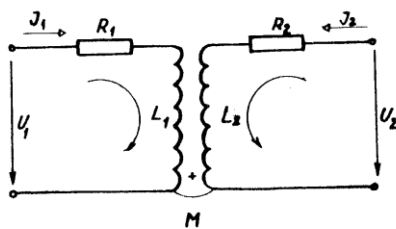
Pro stanovení teoretického výpočtu bude použito jen rovnic a výpočtů pro jednofázový transformátor, protože se vícefázové transformátory pro měření proudu nepoužívají. Proto využijí jen zjednodušený popis jednofázového transformátoru s vzájemnou indukčností.

Rovnice popisující vstupní napětí

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + j\omega L_1 \bar{I}_1 + j\omega M \bar{I}_2 \quad (1)$$

Rovnice popisující výstupní napětí

$$\bar{U}_2 = R_2 \bar{I}_2 + j\omega L_2 \bar{I}_2 + j\omega M \bar{I}_1 \quad (2)$$



Obr. 5 Náhradní schéma jednofázového transformátoru [2]

Mezi základní parametry transformátoru dále považujeme náhradní prvky schématu, mezi něž patří magnetizační reaktance, magnetizační proud a vnitřní napětí transformátoru.

Magnetizační reaktance

$$X_m = \omega M \quad (3)$$

Magnetizační proud

$$\overline{I_m} = \overline{I_1} + \overline{I_2} \quad (4)$$

Vnitřní napětí transformátoru

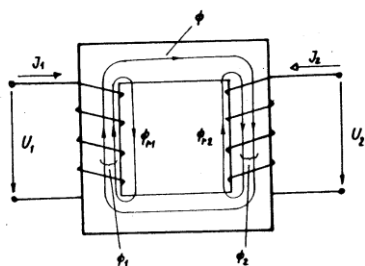
$$\overline{U_0} = jX_m \overline{I_m} \quad (5)$$

#### Stanovení magnetického toku v magnetizačním obvodu

Je to jedna z nejdůležitějších částí celého výpočtu. Stanovujeme jej nejčastěji výpočtem nebo z naměřených hodnot transformátorového plechu nebo pomocí tabulek s předem vypočítanými hodnotami. Postup vlastního výpočtu bude na konkrétním příkladu proveden v části výpočtu vlastního transformátoru proudu.

Pro nastínění uvedu jen základní informace. Na obr. 2 je popsán jednoduchý magnetický obvod s vstupním a výstupním vinutím. V transformátoru se pomocí napětí  $U_1$  indukuje napětí, které vytváří magnetický tok  $\phi_1$ . Tento tok je zmenšen o rozptylový vstupní tok  $\phi_{r1}$ . Po odečtení rozptylového toku získáme celkový vnitřní magnetický tok  $\phi$ .

Na výstupu díky změně magnetického toku  $\phi$  se indukuje napětí  $U_2$ . Avšak i na výstupu se projevuje rozptylový výstupní tok  $\phi_{r2}$ . Jediná možnost jak omezit rozptylový tok je rovnoměrné rozložení po celém jádře magnetického obvodu. Toto lze uskutečnit pouze u toroidního jádra. Které bude použito při výpočtu TP.



Obr. 6 Popis magnetického obvodu [2]

Výpočet magnetického toku

$$\overline{\phi_1} = \overline{\phi} + \overline{\phi_{r1}} \quad (6)$$

Celkový magnetický tok lze stanovit

$$\overline{\phi} = N_1 \overline{I_1} \lambda \quad (7)$$

Pokud chceme stanovit celkový vstupní magnetický tok, je nutné připočítat rozptylovou magnetickou vodivost  $\lambda_{r1}$ .

$$\overline{\phi} = N_1 \overline{I_1} (\lambda + \lambda_{r1}) \quad (8)$$

Pro stanovení základních parametrů transformátoru je nutné ještě nalézt rozptylovou indukčností  $L_{r1}$  a  $L_{r2}$ .

Výpočet rozptylové indukčnosti vstupního vinutí  $L_{r1}$

$$L_{r1} = L_1 - M = N_1^2 \lambda - N_1^2 \lambda_1 = N_1^2 \lambda_{r1} \quad (9)$$

Výpočet rozptylové indukčnosti výstupního vinutí  $L_{r2}$

$$L_{r2} = L_2 - M = N_2^2 \lambda - N_2^2 \lambda_2 = N_2^2 \lambda_{r2} \quad (10)$$

### Stanovení rozptylové reaktance

Stanovení rozptylové vstupní a výstupní reaktance je jedna z důležitých hodnot. Bez těchto parametrů nelze provádět výpočet se zatížením transformátoru. V důsledku nelze zjistit jednotlivé úbytky vnitřního napětí a v návaznosti na to nelze zjistit chybu transformátoru.

Výpočet rozptylové vstupní reaktance

$$X_1 = \omega L_{r1} \quad (11)$$

Výpočet rozptylové výstupní reaktance

$$X_2 = \omega L_{r2} \quad (12)$$

Reálně lze s těmito vzorci realizovat výpočet jednoduchého transformátoru s reálnými vlastnostmi. V praxi se tento výpočet příliš nepoužívá. Nahrazuje se velmi často sofistikovanými programy, které nabízí rychlý výpočet a možnost přímé simulace po zadání hodnot.

## 2.3 Základní převody a přepočty

Mezi základní dovednosti, které je nutné při stanovení a výpočtu transformátoru znát, jsou například převodové poměry a různé přepočty napětí a proudu. Jsou to velmi jednoduché vzorce a uvádím je jako upevnění znalostí, protože jsou základní a měly by být základem pro složitější výpočty. Při tomto výpočtu zanedbáváme odpory a rozptylové reaktance. Dále považujeme vnitřní napětí transformátoru za konstantní pro obě vinutí.

Výpočet napětí vstupu a výstupu

Při výpočtu využíváme vlastností neměnnosti konstanty. A dále uvažujeme stejnou frekvenci a magnetický tok v celém obvodu, jak je patrné z vzorců.

$$U_1 = 4,44f\phi N_1 \quad (13)$$

$$U_2 = 4,44f\phi N_2 \quad (14)$$

Převod transformátoru

„Je podíl vstupního ,ku výstupnímu napětí. Převod transformátoru se udává poměrem napětí při chodu naprázdno. Pouze u malých transformátorů (do 5 kVA) se udává poměr napětí při jmenovitém zatížení. „[2]

Podle typu převodu rozeznáváme základní tři základní typy transformátoru:

- zvyšující převod ( $p > 1$ )
- s konstantním převod ( $p = 1$ )
- snižující převod ( $p < 1$ )

Výpočet převodu

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{4,44f\phi N_1}{4,44f\phi N_2} \quad (15)$$

K výpočtu lze obdobně jako při výpočtu napětí využít přímo počet závitů vinutí.

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (16)$$

Úpravou získáme konečnou rovnici pro převod transformátoru, ve které je vidět opačný poměr pro proudy.

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (17)$$

Výpočet výkonu

Výkon vstupující do transformátoru je stejný jako výkon vystupující z transformátoru.

$$P_1 = P_2 \quad (18)$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (19)$$

Přepočet

Přepočet provádíme z důvodu možnosti zjednodušení analytického výpočtu. Přepočítané hodnoty je možné převádět na vstupní i výstupní stranu transformátorů. Přepočet se nejčastěji provádí na vstupní stranu transformátoru. Po přepočtu vložíme hodnoty do náhradního schématu a je možné s obvodem pracovat jako s reálným elektrickým obvodem.

Pro představu bude prováděn přepočet na vstupní stranu i výstupní stranu.

Převod výstupního napětí na vstupní stranu

$$U'_2 = U_2 \frac{N_1}{N_2} \quad (20)$$

Převod vstupního napětí na výstupní stranu

$$U'_1 = U_1 \frac{N_2}{N_1} \quad (21)$$

Pro stanovení proudů využijeme rovnosti z vzorce.

$$U_2 I_2 = U'_2 I'_2 \quad (22)$$

Převod výstupního proudu na vstupní stranu

$$I'_2 = I_2 \frac{U_2}{U'_2} = I_2 \frac{N_2}{N_1} \quad (23)$$

Převod vstupního proudu na výstupní stranu

$$I'_1 = I_1 \frac{U_1}{U'_1} = I_1 \frac{N_1}{N_2} \quad (24)$$

Pro stanovení přepočtu rezistivity využijeme obdobné metody s použitím vzorce

$$R_2 I_2^2 = R'_2 I'^2_2 \quad (25)$$

Převod výstupního proudu na vstupní stranu

$$R'_2 = R_2 \frac{I_2^2}{I'^2_2} = R_2 \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (26)$$

Převod vstupního proudu na výstupní stranu

$$R'_1 = R_1 \frac{I_1^2}{I'^2_1} = R_1 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad (27)$$

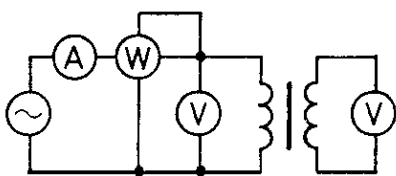
Pro přepočet reaktance je postup stejný jako pro výpočty s rezistivitou a impedancí.

## 2.4 Základní stavy transformátorů

Jak je zřejmé, transformátor pracuje v proměnlivých stavech. Tyto stavy jsou rozděleny na dva základní stavy, ve kterých se stanovují základní parametry transformátorů. Měření provádíme na zapojeném transformátoru naprázdno a nakrátko. V případě ověřování vypočítaných hodnot provádíme měření na zatíženém transformátoru.

### Transformátor naprázdno

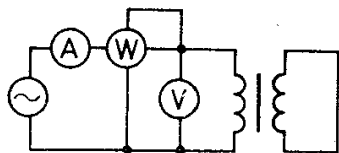
Při tomto měření jsou výstupní svorky odpojeny a měříme jen vlastní magnetizační ztráty v transformátoru. Schéma zapojení je na obr.3 .



Obr. 7 Zapojení při měření naprázdno [3]

### Transformátor nakrátko

Stav transformátoru nakrátko je tvořen zkratováním výstupních svorek, aby byl výsledný sekundární proud maximální. Při tomto měření měříme ztráty ve vinutí a ztráty v jádru.



Obr. 8 Zapojení při měření nakrátko [3]



### 3. Teorie transformátoru proudu

Při teoretickém výpočtu musíme vycházet ze základních předpokladů, jimiž jsou funkční požadavky a požadavky na bezpečnost výrobku. Ty si většinou zákazník zadává při poptávce anebo objednavce. Další hlediska si může zvolit výrobce sám dle ekonomicko – technologických možností výroby.

Při návrhu a výpočtu vycházíme:

- a) „z **požadovaných funkčních hodnot**, tj. především jmenovité zátěže  $P_n$ , třídy přesnosti  $T_p$  a jmenovitého nadproudového čísla  $n_n$ , popř. u speciálních provedení ještě dalších, jako např. u transformátorů pro zemní jištění impedance sekundárního vinutí naprázdno  $Z_{20}$  apod. (u transformátorů s několika sekundárními výstupy jsou tyto hodnoty dány pro každý výstup);“ [1]
- b) „z **požadavků na isolační bezpečnosti a zkratovou odolnost**, vyjádřených údajem o izolaci soustavy (isolovaný nebo účinně uzemněný nulový bod), jmenovitým isolačním napětím  $U_{is}$  a zkratovou třídou  $T_z$ , popř. udáním jmenovitého dynamického a jmenovitého tepelného proudu  $I_{dn}$  a  $I_{9n}$ “; [1]
- c) „z **základních konstrukčních parametrů**, totiž jmenovitého proudění  $F_n$ , materiálu feromagnetického obvodu a materiálu a materiálu vinutí, popř. způsobu  $F_n$  přemagnetizace nebo umělého zapojení pro kompresi chyb.“ [1]

První dva požadavky a) a b) volí nejčastěji zákazník a jediné co je možné z hlediska vlastní konstrukce měnit jen základní konstrukční parametry. Konstrukční parametry hlavně ovlivňují cenu výrobku a technologickou náročnost.

#### 3.1 Základní konstrukční parametry

V základu konstruktér volí jmenovité proudění  $F_n$  podle zvoleného typu feromagnetického materiálu a provedení jádra. To ovlivňuje cenu a spotřebu materiálu.

Mezi jeho další povinnosti je zvolit, jestli bude transformátor průchozí, jednozávitový a nebo vícezávitový. Tímto hlediskem ovlivňuje technologickou náročnost a hospodárnost výroby.

Ze získaných parametrů a předběžného výpočtu získá přehled, jak by měl budoucí transformátor vypadat a kolik bude případný zisk firmy.

#### Definice základních veličin

$I_{In}$  Jmenovitý primární proud – veličina je efektivní hodnota primárního proudu. Slouží ke konstrukčním účelům a je uvedena na štítku.

- $I_{2n}$  Jmenovitý sekundární proud – tato hodnota je další konstrukčním údajem a je na štítku přístroje. Konstruktor má možnosti zvolit jen hodnotu 1 A nebo 5 A (pro vyšší primární proudy, lze použít i hodnotu 10 A). Proud 1 A se používá u jednozávitových transformátorů a násuvných transformátorů do primárního proudu 200A.
- $I_{Im}$  Krajní provozní proud – je hodnota maximálního proudu který může trvale procházet primárním vinutím, aniž by došlo ke zvýšení teploty, která by ovlivňovala přesnosti měření a životnosti transformátoru. Nejčastěji je tato hodnota 120 %  $I_{In}$ .
- $Z$  Vnější břemeno transformátoru proudu – je součet vlastní impedance přístroje a rezistivity přívodů.
- $$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (28)$$
- $Z_i$  Vnitřní břemeno transformátoru proudu – součet reaktance a činného odporu sekundárního vinutí.
- $$Z_i = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} \quad (29)$$
- $Z_c$  Celkové břemeno transformátoru proudu – fázový součet vnějšího a vnitřního břemena.
- $Z_n$  Jmenovité břemeno transformátoru proudu – je to maximální možné břemeno, kterým lze zatížit v měřicím rozsahu, aby nedošlo k překročení dovolené chyby.
- $P$  Zátěž transformátoru proudu – udává hodnotu součinu břemene a čtverce jmenovitého sekundárního proudu.
- $$P = Z I_{2n}^2 \quad (30)$$
- $P_n$  Jmenovitá zátěž transformátoru - je součin jmenovitého břemene a čtverce jmenovitého sekundárního proudu. Je na štítku transformátoru.
- $$P_n = Z_n I_{2n}^2 \quad (31)$$
- $\cos \beta$  Sekundární účinník transformátoru proudu – udává poměr činné rezistivity a impedance břemene.
- $$\cos \beta = \frac{R}{Z} \quad (32)$$
- $k_i$  Jmenovitý převod transformátoru proudu – udává poměr jmenovitého primárního proudu a jmenovitého sekundárního proudu.
- $$k_i = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} \quad (33)$$
- $\varepsilon_i$  Chyba proudu – chyba je způsobena vnitřním úbytkem napětí, který se projeví změnou sekundárního proudu. Výpočet provádíme pomocí vzorce.
- $$\varepsilon_i = \frac{I_2 k_i - I_1}{I_1} 100 \quad (34)$$
- $\vartheta_i$  Chyba úhlu – udává fázový rozdíl mezi primární a sekundárním fázovým úhlem. Ideální je nulový sekundární, ale ten není reálný, proto se uvádí toleranční pole.

### 3.2 Dovolené chyby měřících transformátorů proudu

Při návrhu a kontrole výpočtu je důležité dodržet maximální hodnoty dovolených chyb (viz tab.

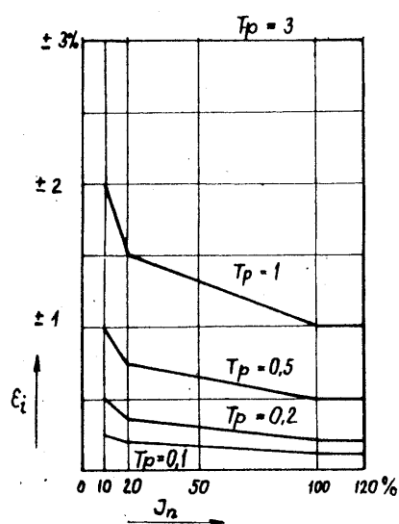
4). Daná tabulka udává maximální hodnoty chyby proudu a úhlů v závislosti na třídě přesnosti.

PRIM. PROUD V % $I_{In}$			Třída přesnosti měřících transformátorů proudu							
	0,1		0,2		0,5		1		3	
	Dovolená chyba proudu $\varepsilon_i$ a $\delta_i$									
	$\pm \varepsilon_i$	$\pm \delta_i$	$\pm \varepsilon_i$	$\pm \delta_i$	$\pm \varepsilon_i$	$\pm \delta_i$	$\pm \varepsilon_i$	$\pm \delta_i$	$\pm \varepsilon_i$	$\pm \delta_i$
	%	Min	%	min	%	min	%	min	%	min
10	0,25	10	0,5	20	1,0	60	2,0	120	-	-
20	0,2	8	0,35	15	0,75	45	1,5	90	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0	-
100	0,1	5	0,2	10	0,5	30	1,0	60	3,0	-
120	0,1	5	0,2	10	0,5	30	1,0	60	3,0	-

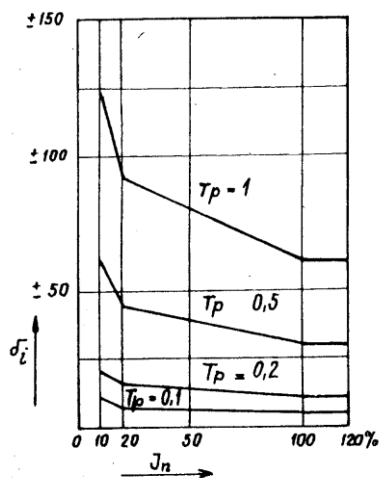
Tab. 4 Dovolných chyb MTP [2]

#### Grafické znázornění chyb

Grafické znázornění lépe vystihuje řešený problém. Pro hodnotu 50 %  $I_{In}$  není hodnota určena, ale to neznamená, že může být jakákoliv. Měla by se však pohybovat do hodnoty grafického znázornění na obr. 9. V závislosti na tab. 4 je na obr. 9 a obr. 10 znázorněna maximální přípustná hodnota chyb pro všechny třídy přesnosti.



Obr. 9 Grafické znázornění chyby proudu [2]



Obr. 10 Grafické znázornění chyby úhlu [2]

### 3.3 Dovolené chyby jistících transformátorů proudu

Třída přesnosti je pro jistící obvody udávána jinak z důvodu rozpoznání na štítku a jiné přesnosti a tolerance měření. Mezi základní zápisy patří 5P a 10P. Pro jistící transformátory je upraven rozsah na 50% až 100% jmenovitého primárního proudu. Hodnota před písmenem P udává hodnotu celkové chyby proudu, jak je možné pozorovat v tab. 2. A pro názornost uvedu příklad.

Například:

5P – má chybu proudu 5 %

10P – má chybu proudu 10 %

Pro tento zápis považujeme nadproud roven 1 násobku jmenovitého proudu. Což je při proudu  $I_{n1}=200$  A přesně 200 A.

TŘÍDA	CHYBA PROUDU	CHYBA ÚHLU	CELKOVÁ CHYBA
	PŘI JEMNOVITÉM PRIMÁRNÍM PROUDU		PŘI JEMNOVITÉM NADPROUDU
	$\pm \varepsilon_i$	$\pm \delta_i$	
	%	min	%
5 P	1	60	5
10 P	3	-	10

Tab. 5 Tabulka tříd přesnosti jistících transformátorů [2]

### 3.4 Nadproudové oblasti

Dalším důležitým ukazatelem je nadproudová oblast. Tato hodnota nám udává, jak moc může vzrůst primární proud, aniž by došlo k saturaci (přesycení) TP. Oblast přesycení je pro konstruktéra velice důležitá a to kvůli spotřebě materiálu. Zákazník si zadá nadproudové číslo TP a to musí konstruktér dodržet. Anebo případně může zvýšit, záleží na konstrukčně-ekonomickém návrhu.

#### Nadproudový činitel proudu pro měřicí transformátory

Měřicí transformátor pracuje v oblasti provozní a v oblasti nadproudové. Při normálním provozu sítě pracuje MTP v provozní oblasti. Ale pokud se přetíží síť anebo nastane zkrat v síti, přesune se do oblasti nadproudové, a v případě špatného výpočtu nastává poškození transformátoru.

Z toho důvodu je důležité porovnávat i další parametry transformátorů v nadproudové oblasti, a proto uvedu několik základních definic parametrů.

Nadproudová charakteristika je závislost sekundárního proudu na primárním proudu v nadproudové oblasti MTP.

- $n$  Nadproudové číslo TP – je hodnota primárního proudu, při které dosáhne chyba proudu 10 %. Tato hodnota je pro MTP. Pro jistící transformátory je tato hodnota jiná, bude probráno dále v textu.
- $n_n$  Jmenovité nadproudové číslo TP – je hodnota nadproudu při provozním zatížení sekundárního vinutí. Jmenovitým břemenem a kmitočtem, při konstantním jmenovitém účinníku.

#### Nadproudový činitel proudu pro jistící transformátory

Pro jistící transformátory je nejdůležitější hodnota jmenovitého primárního nadproudu. Jmenovitý nadproud je součinitel jmenovitého primárního proudu a jmenovitého nadproudového činitele. Anebo se definuje jako hodnota primárního proudu, při které dosáhne celková chyba ( $\varepsilon_c$ ) předepsané hodnoty.

Nadproudový činitel jistícího transformátoru je údaj, který nám říká jaké nadproudy je možné s daným transformátorem jisti. Doporučené hodnoty nadproudových činitelů jsou 5,10,15,20,30.

Zápis v tomto případě bude doplněn o číslovku za písmenem P.

Například:

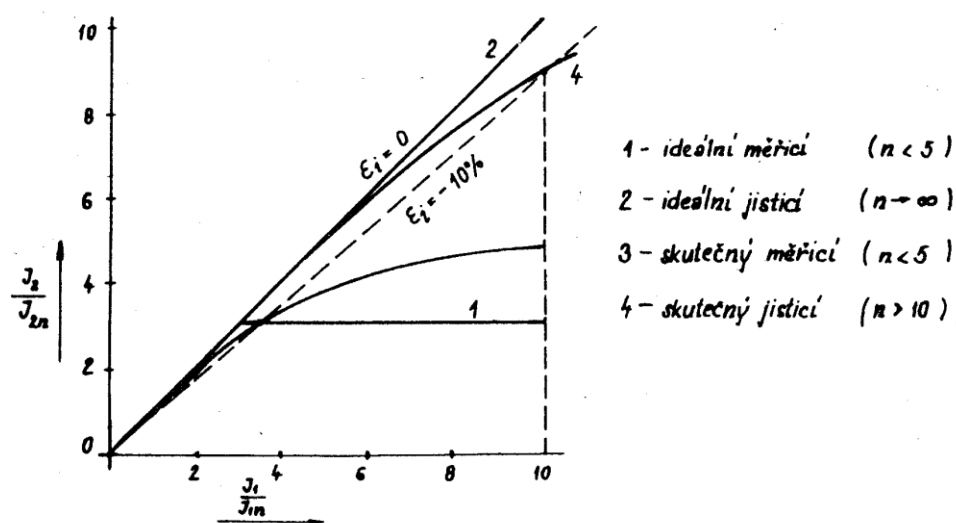
5P15 – znamená, že celková chyba proudu bude 5% v rozsahu 15 násobku jmenovitého proudu  $I_{nI}$ . Maximální proud bude tím pádem  $15 \times I_{nI}$ .

15P5 – znamená, že celková chyba proudu bude 15% v rozsahu 5 násobku jmenovitého proudu  $I_{nI}$ . Maximální proud bude tím pádem  $5 \times I_{nI}$ , ale jistící transformátor pracuje v rozsahu 50% až 100% nadproudového činitele.

### Rozdíly mezi transformátorem měřicím a jistícím

Hlavní rozdíly jsou v nadproudové oblasti. Nejlépe je to patrné na obr. 11, který porovnává ideální a skutečný stav transformátoru jistícího a měřícího. Ideální jistící transformátor má být ideálně přímka s chybou proud  $\varepsilon_i = 0$ , ale reálně se pohybuje do  $\varepsilon_i = 10\%$ .

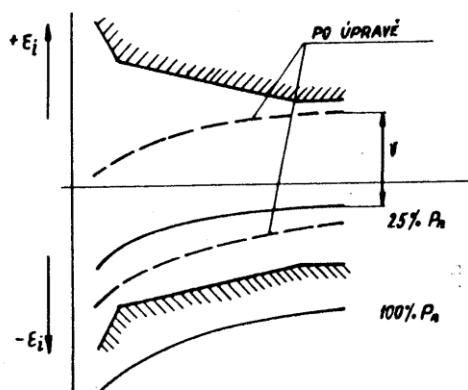
Ideální transformátor měřicí by měl po určité hodnotě proudu zůstat konstantní. Ale skutečný transformátor pracuje přibližně konstantě (linearizovaný) jen v málem proudovém rozsahu. Při výpočtu se vždy snažíme co nejvíc ideálního stavu, ale je to souboje technologicko- ekonomických požadavků.



Obr. 11 Porovnání měřícího a jistícího TP z hlediska nadproudových činitelů [2]

### 3.5 Závítová korekce

Závítová korekce je ve své podstatě mechanická anebo jiná úprava chyby proudu. V případě transformátoru s vyšší třídou přesnosti 3% a 5%. Je nutné celé série výrobků upravit na danou přesnost. Protože při výrobě získáváme špatné rozložení chyby v poměru kladné a záporného ohraničení chyby. Nejlépe je tento problém vystižen na obr. 12. Při dané závítové korekci provádíme přesun pole chyb z oblasti záporné části do oblasti kladné části chyb proud.



Obr. 12 Znáznornění pole chyb u transformátoru se závítovou korekcí

#### Základní typy úpravy chyb

- a) Změnou počtu závitů na sekundárním vinutí

Je jedna z nejvíce využívaných metod. Při této metodě snižujeme počet závitů na sekundární straně transformátoru. Pro určení musíme znát, o kolik je nutné zvýšit sekundární proud. Hodnota změny proudu se uvádí v procentech a má označení  $v$ . Výsledný počet závitů sekundárního vinutí vypočítáme pomocí vzorce (35).

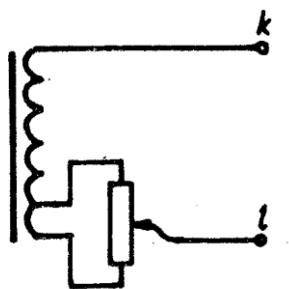
Výpočet počtu závitů sekundárního vinutí

$$N_2^k = N_2 - N_2 \frac{v}{100} = N_2 \left(1 - \frac{v}{100}\right) \quad (35)$$

- b) Pomocí odporového a indukčního děliče

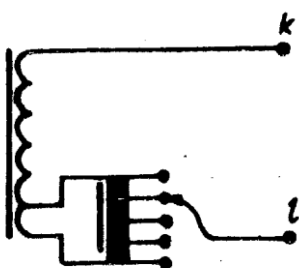
Při této metodě připojujeme mezi poslední závit odporový dělič anebo indukční dělič. Často je dělič nalisován přímo na jádře transformátoru. Při nastavování se pomocí děliče mění napětí posledního závitu a tím ovlivňuje celkový proud transformátoru. Nastavená hodnota děliče je zajištěna zapájením anebo přivařením.

Zapojení odporového děliče



Obr. 13 Znáznorněné zapojení odporového děliče

Zapojení indukčního děliče



Obr. 14 Zapojení indukčního děliče

c) Rozdělení průřezu transformátoru na dvě části

Tato metoda není příliš používaná. Je to z důvodu zvýšené náročnosti výroby. Další nevýhodou je průtok vyrovnávacích proudů, který zhoršuje přesnost. Metoda je založena na rozdělení vypočítaného jádra na dvě samostatná jádra. Na kterých je navinuto vinutí o stejném průřezu, ale o jiném počtu závitů. Nejčastěji si rozdělíme proud v poměru proudu  $I_2' = 1$  A a  $I_2'' = 4$ . Pro náš případ využijeme příkladu transformátoru s převodem 100/5 A a počtem závitů primárního vinutí  $N_1 = 1$ . Poté vypočítáme s pomocí vzorců (36,37) počet závitů sekundárních vinutí.

Výpočet počtu závitů pro rozdělená jádra

$$N_2' = \frac{N_1 I_1}{I_2'} = \frac{100}{1} = 100 \quad (36)$$

$$N_2'' = \frac{N_1 I_1}{I_2''} = \frac{100}{4} = 25 \quad (37)$$

Zároveň platí rovnosti

$$U_2' = U_2'' \quad (38)$$

$$222BS_j N_2' = 222BS_j'' N_2'' \quad (39)$$

Výsledná magnetická indukce bude v obou jádrech stejná.

$$\frac{N_2'}{N_2''} = \frac{S_j''}{S_j'} \quad (40)$$

Výsledný poměr průřezů jádra vypočítáme takto:

$$\frac{S_j''}{S_j'} = \frac{100}{25} = 4 \quad (41)$$



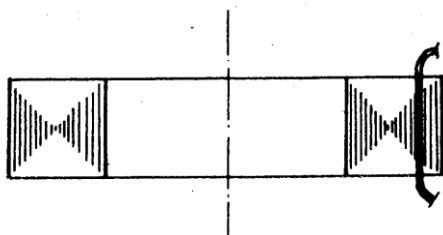
Korekci závitů provádíme vždy na straně s větším počtem závitů, aby byla změna proudu minimální.

d) Rozdělení sekundárního vinutí na dvě paralelní větve

Princip je založen na rozdělení proudu na dvě paralelní vinutí na stejném jádře. Uskutečňuje se to principem změny průřezu sekundárního vinutí. V praxi si rozdělíme proud v určitém poměru a upravíme průřez. Například máme jmenovitý sekundární proud  $I_{2n} = 5 \text{ A}$ . V tom případě si rozdělíme proud v poměru 1 A a 4 A. A daný průřez vinutí rozdělíme v poměru. Například  $S_2' = 2 \text{ mm}^2$  a  $S_2'' = 0,5 \text{ mm}^2$ . Závitovou korekci provádíme na vinutí s menším průřezem. Stejně jako v předchozím případě se mohou vyskytovat i vyrovnávací proudy.

e) Provedení neúplného závitu

Postup s neúplným závitem se využíval v dřívějších dobách velmi často. Ale mezi nevýhody patří umístění neúplného závitu před vlastním navíjením. Používají se neúplné závity v provedení 1/3, 1/2 a 2/3. Tento princip je založen na omezení průchodu magnetického toku jen částí závitu.



Obr. 15 Znárodnění vloženého neúplného závitu

#### 4. Postup výpočtu TP

Popis postupu výpočtu bude prováděn pro transformátor s toroidním jádrem. Toroidní jádro je nejvíce používaným typem jádra, a to hlavně z důvodu téměř minimální hodnoty rozptylové reaktance. Další výhodou je nízký odpad materiálu při výrobě z plechových pásů. Výpočet je však možné upravit i pro jiné typy transformátorových jader. Vlastní podstata je stejná pro všechny transformátory, ale je nutné připočítat rozptylovou reaktanci. Než začneme s vlastním výpočtem musíme nejdříve stanovit anebo získat potřebné základní údaje.

Pro výpočet musíme znát základní údaje:

- $T_p$  – třídu přesnosti transformátoru proudu
- $n$  – nadproudové číslo
- $I_{1n}$  – jmenovitý primární proud
- $I_{2n}$  – jmenovitý sekundární proud
- $U$  – jmenovité napětí rozvodné soustavy
- $P$  – jmenovitý výkon (výkon zátěže)

Pokud není nějaká hodnota zadána, je nutné ji odvodit anebo se přiblížit k nějakému standartnímu provedení.

Jmenovité primární proudění

Při výpočtu postupujeme od zvolení jmenovitého proudění, které se volí pro  $F_I$  v rozmezí 600 až 900 Az [2]. Při volbě bychom měli využít praktické znalosti z výroby, anebo je vyčíst z nějakého katalogu pro daný materiál.

##### 4.1 Výpočet závitů

Při výpočtu závitů postupujeme od primárních závitů k sekundárním závitům. A současně musíme dodržet všechny zásady výpočtu.

Výpočet primárního závitu

$$N_1 = \frac{F_1}{I_{1n}} [2] \quad (42)$$

Jak je patrné z výpočtu, je nutné při výpočtu zvolit hodnotu odpovídající danému provedení. Hodnotu primárního závitu dosadíme do vzorce pro výpočet závitů sekundárního vinutí.

Výpočet sekundárních závitů

$$N_2 = \frac{N_1 I_{1n}}{I_{2n}} [2] \quad (43)$$

Vzorec je praktický stejný jako pro výpočet primárních závitů. Hlavní roli zde hraje primární proudění  $F_I$ .

Výpočet průřezu primárního vodiče

$$S_1' = \frac{I_{thn}}{\sigma_{thn}} [2] \quad (44)$$

Při tomto výpočtu vycházíme ze znalosti transformátoru proudu při zkratech. Zkratový odolnost je schopnosti odolávat tepelným, dynamickým a elektrickým účinkům. Které vytváří nadproud v potažmo zkratový nebo pouchový stav.

Základem je proudová hustota vodiče  $\sigma_{thn}$ , který je udána pro elektrovednou měď  $\sigma_{thn} = 180 \text{ A/mm}^2$  [2]. Pro hliník je udávaná hodnota  $\sigma_{thn} = 118 \text{ A/mm}^2$  [2].

Pro výpočet musíme stanovit hodnotu jmenovitého krátkodobého proudu  $I_{thn}$

$$I_{thn} = s_v \sigma_{thn} \quad (45)$$

Hodnota  $s_v$  je průřez primárního vodiče a je to v podstatě stejná hodnota jako  $S_1'$ . A nejčastěji je hodnota jmenovitého krátkodobého proudu  $I_{thn}$  zadána při objednávce.

Zkratová třída

Zkratová třída se dnes už nepoužívá, takže ji uvádíme jen jako informativní. Protože se může někdy vyskytovat na starších transformátorech anebo v literatuře k danému tématu.

Zkratová třída je hodnota, která udává vztah mezi jmenovitým tepelným proudem a jmenovitým primárním proudem.

$$T_z = \frac{I_{thn}}{I_n} = \frac{\sigma_{thn}}{\sigma_n} \quad (46)$$

Zkratové třídy se udávají v řadách a ty jsou 70, 90, 120, 150, 250, 400, 600, 900, 1300.

Po dosazení do vzorce získáme hodnotu jmenovitého krátkodobého proudu  $I_{thn}$ .

#### Výpočet průřezu sekundárního vinutí

Ve své podstatě se průřez sekundárního vinutí nepočítá, využívá se praktických zkušeností a získaných vědomostí z praxe. Ale je nepsaným pravidlem volit při sekundárním proudu 5 A.

Nejčastěji volíme průměr 1,6 mm ( $2 \text{ mm}^2$ ) a pro vyšší krátkodobé proudy. Pro vyšší krátkodobé proudy se používají navinuté dva paralelní vodiče stejného průřezu.

Při použití sekundárního proudu 1 A je volen průměr 0,8 mm ( $0,5 \text{ mm}^2$ ). Při výpočtech s těmito vodiči je nutné brát v úvahu i vrstvu izolace, která se do průřezu musí dopočítat.

## **4.2 Izolace z epoxidu**

Při volbě rozměrů izolačního předělu vycházíme z předem experimentálně zjištěných hodnot nebo provedeme přesný výpočet. Většinou se volí první možnosti, protože simulace a vlastní výpočet je náročný a ekonomicky nezajímavý. Lépe je použít více materiálu a mít jistotu že zařízení je bezpečné.

Tloušťka izolačního předělu ( $t_i$ ) z epoxidové pryskyřice je experimentálně zjištěna pro tři základní napěťové hladiny.

U[kV]	t <sub>i</sub> [mm]
12	9 – 10
25	14 – 16
38	22 – 25

Tab. 6 Tabulka vrstvy izolačního předělu pro napěťové hladiny [2]

### 4.3 Výpočet jádra transformátoru

Při výpočtu jádra vycházíme z hodnoty maximální indukce  $B_m$ , kterou dosadíme do vzorce (47) a získáme tím hodnotu jmenovité magnetické indukce  $B_n$ . Nejčastější hodnota pro transformátorové plechy za tepla válcované je  $B_m=1,6$  T, ale transformátorové plechy za studena válcované mají o trochu vyšší hodnotu  $B_m=1,8$  až 2 T. Tímto způsobem lze snížit váhu transformátoru nebo je možné využít nové materiály, ale jsou dražší.

$$B_n = \frac{B_m}{0,9n} \quad (47)$$

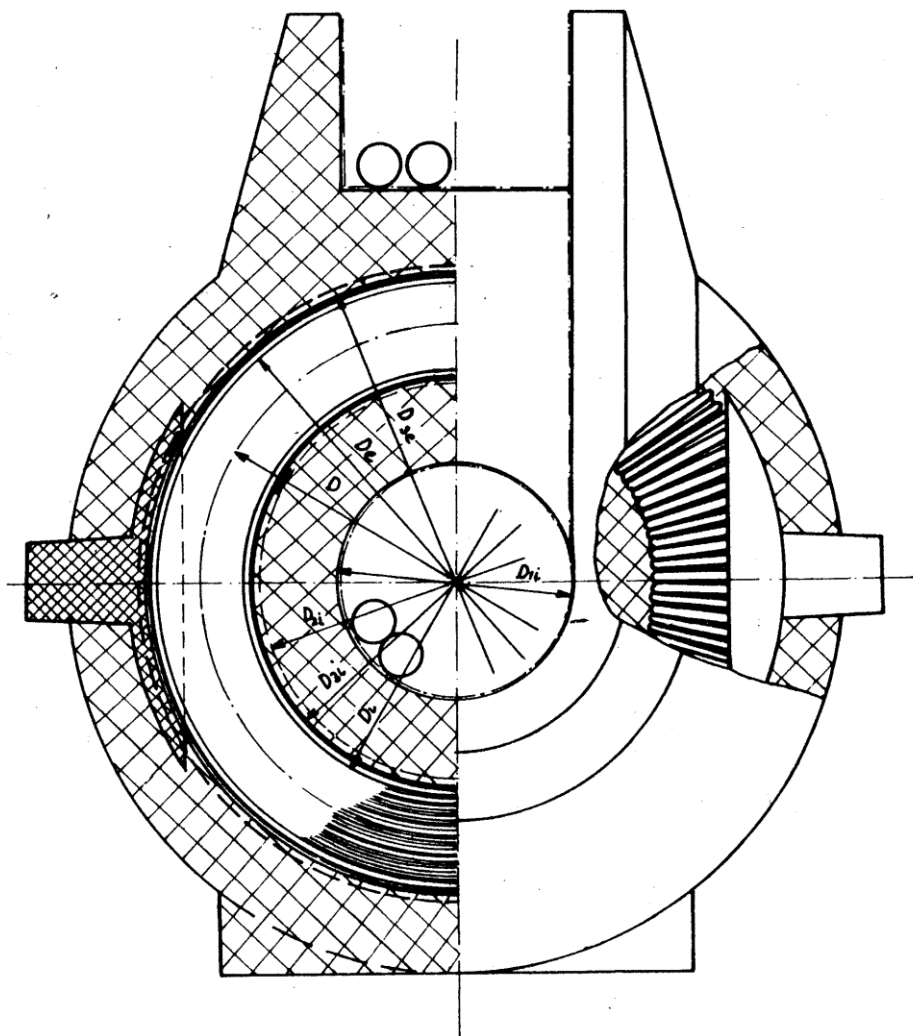
#### Předběžný výpočet průřezu jádra

Průřez jádra volíme předběžně, protože při výpočtu se bude měnit. A z důvodu výpočtu rozměrů jádra se bude tato hodnota mírně měnit. Při předběžném výpočtu je hodnota 1,3 předběžná ztráta v sekundárním vinutí. Hodnotu  $\xi$  - činitele plnění magnetického obvodu volíme v rozmezí 0,9 až 0,95.

$$S' = \frac{1,3P}{4,44fB_nN_2\xi I_{2n}} \quad (48)$$

#### Volba rozměrů toroidního transformátoru

Nejčastěji volíme výšku jádra  $h$  5 krát vyšší než je zvolená šířka jádra  $b$ . Zároveň volíme často šířku jádra  $b$  jako sudé číslo. Průřez jádra s kotováním je zobrazen na obr. 1. Za daných předpokladů se často volí rozměry jádra podle vyráběných standardů v závodě. Například střížnými nástroji je dána šířka stříhání plechu, která nám udává výšku jádra  $h$ . A je možné měnit jen šířku jádra  $b$ , kterou ovlivníme počtem navinutých vrstev. Toroidní transformátor je ve své podstatě ekonomicky nejúspornější řešení, při kterém nevzniká skoro žádný odpad. Proto dnes převládá jeho výroba.



Obr. 16 Popis rozměrových kót transformátoru a jejich vizuální umístění vzhledem ke středu jádra [2]

Úpravou vzorců (49, 50) získáme při dosazení hledanou hodnotu šířky anebo výšky jádra. Ale musíme dodržet předpoklad, že nalezená hodnota průřezu bude stejná anebo větší než předběžně vypočítaný průřez.

$$S' = hb \quad (49)$$

$$S = hb \geq S' \quad (50)$$

#### Vnitřní průměr jádra

Pro stanovení vnitřního průměru jádra musíme nejdříve stanovit aktivní průřez vinutí. Pro případ násuvného transformátoru proudu je celkový průřez dán průměrem vodiče a nezbytným přídatkem pro nasunutí. A v případě více závitových transformátorů je možné použít vzorec (51). Celkový průřez primárního vinutí

$$S_{1N} = N_1 S_1' \quad (51)$$

Hodnotu primárního průřezu vodiče  $S_1'$  vypočítáme pomocí vzorce (44). A počet závitů primárního vinutí stanovíme pomocí vzorce (42). V případě že je primární vinutí složeno z více závitů, musíme dále použít vzorec (52).

Výpočet potřebného průřezu na provlečení primárního vodiče

$$S_{Cu} = \frac{S_1 N}{\chi} \quad (52)$$

Hodnota  $\chi$  je bezrozměrná a je zjištěna experimentálně. Volíme ji přibližně 0,3. V přímé návaznosti je zjištění kruhového průřezu nevinutého vinutí primárního vodiče.

Výpočet průměru kruhového průřezu

$$D_{1i}' = \sqrt{\frac{4S_{Cu}}{\pi}} \quad (53)$$

Hodnotu z vzorce (52) dosadíme do vzorce (53) a získáme hodnotu průměru  $D_{1i}'$

Výpočet vnitřního průměru pouzdra

$$D_{3i}' = D_{2i}' + 2t_2 \quad (54)$$

Pro stanovení  $D_{3i}'$  musíme nejdříve stanovit  $D_{2i}'$  a  $t_2$ .

Výpočet průměru  $D_{2i}'$  s minimální izolací  $t_i$

$$D_{2i}' = D_{1i}' + 2t_i \quad (55)$$

Výpočet výšky sekundárního vinutí  $t_2$

Nejdříve využijeme vzorce pro výpočet počtu vrstev sekundárního vinutí (56)

$$n_2 = \frac{N_2}{\pi D_{2i}' \zeta_1} d_{2i} \quad (56)$$

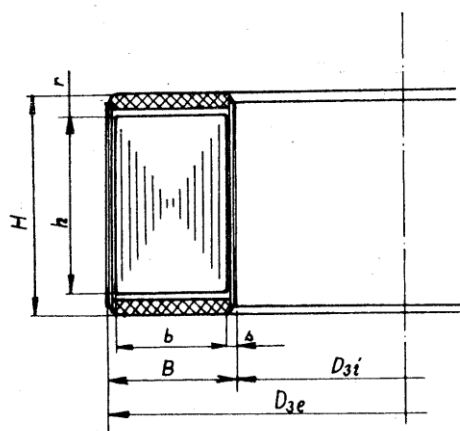
Tuto hodnotu dosadíme do finálního vzorce (57)

$$t_2 = n_2 d_{2i} \zeta_2 \quad (57)$$

Výpočet vnitřního průměru jádra

$$D_i' = D_{3i}' + 2s \quad (58)$$

Hodnota  $s$  – se pohybuje v rozmezí 2-2,5mm. Je to boční dilatační izolace. Jak je patrné na obr. 17.



Obr. 17 Znáznorněná průřez jádra s kótováním rozměrů [2]

### Výpočet zbývajících rozměrů

Po stanovení výšky a šířky jádra je možné stanovit finální rozměry jádra, které dále budou sloužit k výpočtu elektrických vlastností jádra.

Výpočet vnějšího průměru jádra

$$D_e = D_i + 2b \quad (59)$$

Střední průměr jádra

$$D = D_i + b \quad (60)$$

Výška zapouzdřeného jádra

$$H = h + 2r \quad (61)$$

Do rovnice musíme dosadit konstantu  $r$ , která reprezentuje velikost pouzdra (jeho šířku). Hodnota se často pohybuje v rozmezí 3,5 až 5 mm.

Šířka zapouzdřeného jádra

$$B = b + 2s \quad (62)$$

Hodnota  $s$  je stejná jako  $r$  a má i stejný rozsah.

### **4.4 Kontrola proudové a úhlové chyby transformátoru**

Po výpočtu rozměrů je nutné zkontrolovat hodnotu nadproudového čísla. A poté je možné pokračovat ve výpočtu vlastní chyby transformátoru. Výpočet nadproudového čísla budeme provádět podle následující sestavy rovnic.

Výpočet stření délky závitu sekundárního vinutí

$$l_2 = 2(B + H) + \pi t_2 \quad (63)$$

Výpočet odporu sekundárního vinutí

$$R_2 = \frac{N_2 l_2 \rho}{S_2} \quad (64)$$

Odpor sekundárního vinutí je vlastně hodnota vnitřního břemena. Mezi hlavní výhody toroidního transformátoru patří to, že se neprojevuje relativní rozptylová indukčnost. Je to způsobeno rovnoměrným rozložením vinutí. Proto uvažujeme jen s reálnou rezistivitou.

Výpočet vnitřní zátěže

$$P_i = R_2 I_{2n}^2 \quad (65)$$

Jmenovité břemeno a jeho složky

$$Z_n = \frac{R_2}{I_{2n}^2} \quad (66)$$

Přičemž je platný vzorec

$$Z_n = \sqrt{R^2 X^2} \quad (67)$$

Hodnota posunu reálné a imaginární části se většinou pohybuje okolo  $\cos\beta=0,8$ .

Výpočet činné složky

$$R = Z_n \cos \beta \quad (68)$$

Výpočet jalové složky

$$X = Z_n \sin \beta \quad (69)$$

Výpočet zátěže jmenovitého břemene

$$P_n = Z_n I_{2n}^2 \quad (70)$$

Výpočet činné složky jmenovité zátěže

$$P_\xi = P_n \cos \beta \quad (71)$$

Výpočet jalové složky jmenovité zátěže

$$P_j = P_n \sin \beta \quad (72)$$

Celková zátěž transformátoru při jmenovitém proudu

$$P_c = \sqrt{(P_\xi + P_j)^2 + P_j^2} \quad (73)$$

Výpočet hodnota jmenovité magnetické

$$B_{sk} = \frac{P_c}{4,44 f S \xi N_2 I_2} \quad (74)$$

Výpočet kontroly nadproudového čísla

$$n_{sk} = \frac{B_m}{0,9 B_{sk}} \quad (75)$$

### Výpočet chyby

Výpočet chyby provádíme pro hodnoty 10%, 20%, 50%, 100% a 120% jmenovité hodnoty proudu. A dále se provádí výpočet pro hodnotu 100% a 25% jmenovitého břemena.

Výpočet chyby proudu

$$\varepsilon_i = -\frac{I_{20}}{I_{2n}} \cos \alpha \cdot 100 \quad (76)$$

Výpočet chyby úhlu

$$\delta_i = 3440 \frac{I_{20}}{I_{2n}} \sin \alpha \quad (77)$$

Výpočet magnetické indukce

$$B_{sk}^{0,1} = \frac{\sqrt{[(R+R_2)(0,1 \cdot I_{2n})^2]^2 + [X(0,1 \cdot I_{2n})^2]^2}}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot 0,1 \cdot I_{2n}} = \frac{\sqrt{[(R+R_2)(0,1 \cdot I_{2n})^2]^2 + [X(0,1 \cdot I_{2n})^2]^2}}{222 \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot 0,1 \cdot I_{2n}} \quad (78)$$

Tento vzorec je pro magnetickou indukci při jmenovitém proudu 10%, ale výpočet provádíme i pro následující hodnoty jmenovitého sekundárního proud. Ty jsou 20%, 50%, 100% a 120%  $I_{2n}$ .

Pro názornosti uvedu ještě vzorec pro výpočet magnetické indukce při jmenovitém proudu 120%  $I_{2n}$ .

$$B_{sk}^{1,2} = \frac{\sqrt{[(R+R_2)(1,2 \cdot I_{2n})^2]^2 + [X(1,2 \cdot I_{2n})^2]^2}}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot 1,2 \cdot I_{2n}} = \frac{\sqrt{[(R+R_2)(1,2 \cdot I_{2n})^2]^2 + [X(1,2 \cdot I_{2n})^2]^2}}{222 \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot 1,2 \cdot I_{2n}} \quad (79)$$

Výpočet magnetické indukci při zatížení 25%  $Z_n$

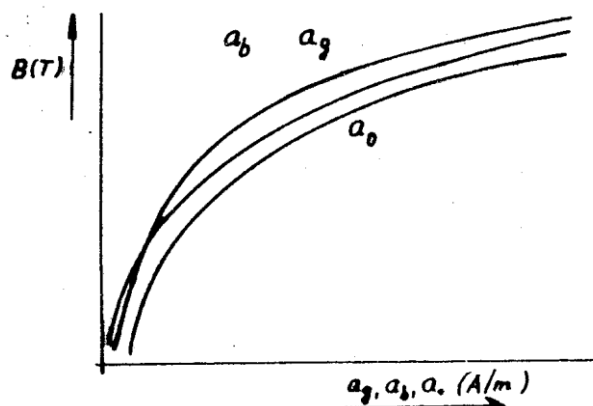


$$B_{sk25\%}^{0,1} = \frac{\sqrt{[(R+(R_2 \cdot 0,25))(0,1 \cdot I_{2n})^2]^2 + [(X \cdot 0,25)(0,1 \cdot I_{2n})^2]^2}}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot 0,1 \cdot I_{2n}} \quad (80)$$

I při 25%  $Z_n$  se výpočet provádí pro všechna proudová zatížení.

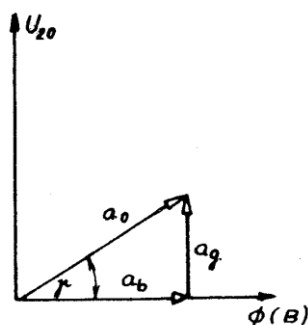
### Měrné budící proudění

Nejčastěji se stanovuje hodnota měrného budícího proudění z grafu (obr. 18), kde je možné odečíst hodnoty měrného budícího proudění  $a_0$ , měrného budícího proudění činného  $a_g$  a měrného budícího proudění jalového  $a_b$ .



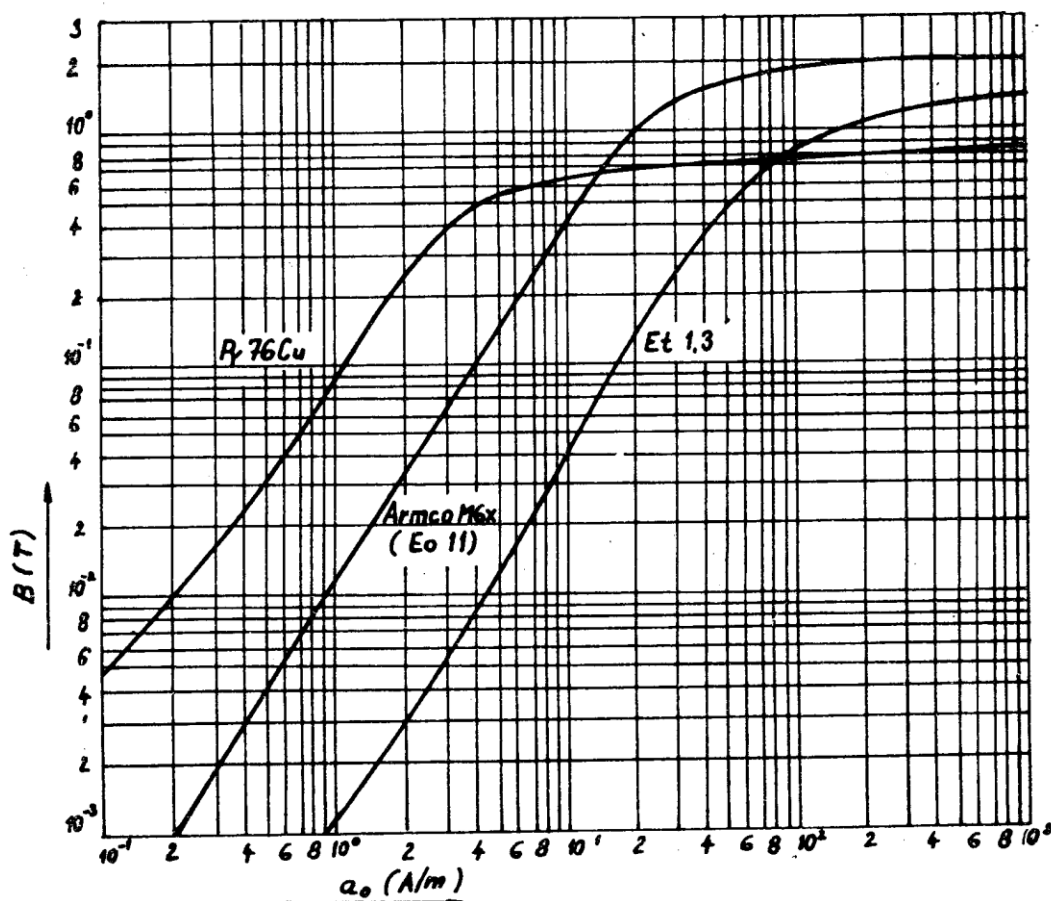
Obr. 18 Graf pro odečítání měrného budícího proudění [2]

Měrného budícího proudění je závislé na napětí  $U_{20}$  a magnetické toku  $\phi$ , jak je patrné z obr. 18.



Obr. 19 Závislost měrného budícího proudění na vnitřním napětí transformátoru [2]

Pokud nemáme k dispozici graf se závislostí činného a jalového měrného budícího proudění, je možné odečíst z grafu závislosti jen měrného budícího proudění  $a_0$  (obr. 20) a vypočítat pomocí vzorce (81) hodnotu měrného budícího proudění činného. A poté dopočítat pomocí měrného budícího proudění  $a_0$  a měrného budícího proudění činného  $a_g$ . Hodnotu měrného budícího proudění jalového  $a_b$  vypočítáme vzorcem (82).



Obr. 20 Graf závislosti magnetické indukce  $B$  a měrného budícího proudění  $a_0$  [2]

Výpočet měrného budícího proudění – činná složka

K stanovení hodnoty měrného budícího proudění (činné složky) je nutné pomocí hodnot z grafu (21) odečíst hodnotu měrných ztrát  $p_{Fe}$  a z tabulky (7) stanovit měrnou hustotu feromagnetického materiálu  $\gamma_{Fe}$ .

$$a_g = \frac{p_{Fe} \gamma_{Fe}}{4,44 f B} \quad (81)$$

Poté stanovíme pomocí vzorce hodnotu měrného budícího proudění jalové složky (82). Případně je možné rovnou stanovit velikost úhlu  $\gamma$ , který je znázorněn na obr. (18).

Výpočet měrného budícího proudění – jalová složka

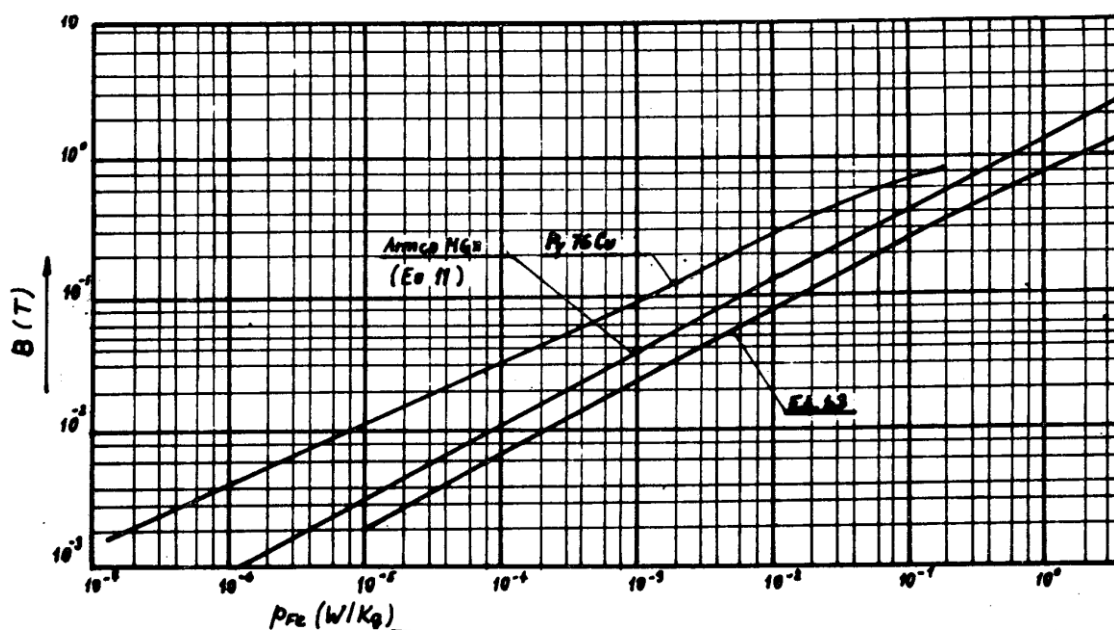
$$a_b = \sqrt{a_0^2 - a_g^2} \quad (82)$$

Výpočet úhlu  $\gamma$

$$\cos \gamma = \frac{a_b}{a_0} \quad (83)$$

## Měrné ztráty

Měrné ztráty  $p_{Fe}$  jsou závislé na materiálu a hlavně na magnetické indukci  $B$ . Jak je patrné z obr (21) je možné odečítat tuto hodnotu jen s malou přesností. Ale k výpočtu je to dostačující.



Obr. 21 Závislost měrných ztrát  $p_{Fe}$  na změně magnetické indukci  $B$  [2]

## Měrná hmotnosti feromagnetického materiálu

Měrná hmotnost feromagnetického materiálu je závislá na hustotě daného materiálu. Hodnotu nalezneme v technické dokumentaci od výrobce. Ale v praxi se můžeme při některých aplikacích setkat s míchanými feromagnetickými jádry. V takových případech se stanovuje hlavně poměr použitého materiálu k jiným složkám. V praxi se setkáváme nejvíce se základními materiály, které se po mnoho let používají a ty jsou popsány v tabulce (7).

Feromagnetické materiály	Měrná hustota feromagnetického materiálu $\gamma_{Fe}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Py 76 Cu	8690
Permalloy	8600
ARMCO M6X	7650
Eo 1,7	7650
Sonaperm	7650
Et 1,3	7600

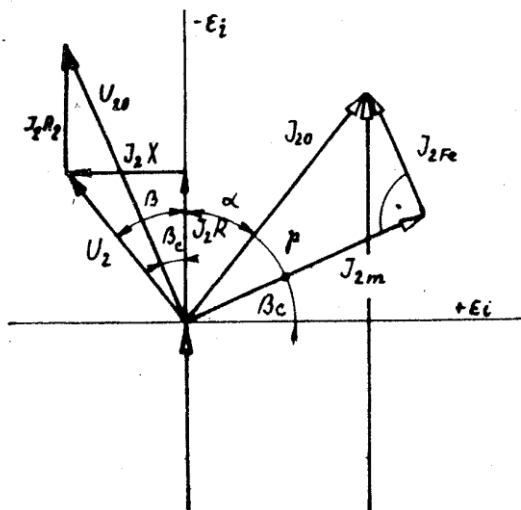
Tab. 7 Tabulka měrné hmotnosti feromagnetického materiálu [1]

### Úhel $\beta_c$

Jak je znázorněno na obr. (22) je to úhel, který svírá vnitřní napětí transformátoru  $U_{20}$  a svislá osa chyby proudu  $\varepsilon_i$ .

### Výpočet úhlu $\beta_c$

$$\operatorname{tg} \beta_c = \frac{X}{R+R_2} \quad (84)$$



Obr. 22 Zakreslení úhlů v závislosti na chybě proudu [2]

### Úhle $\alpha$

Jak je patrné z obr. (22) je to vnitřní úhel, který svírá kolmá osa chyby proud  $\varepsilon_i$  a vnitřní proud  $I_{20}$ .

### Výpočet úhlu $\alpha$

$$\alpha = 90 - (\beta_c + \gamma) \quad (85)$$

## **4.5 Výpočet chyby proudu a chyby úhlu**

Výpočet chyby proudu provádíme rovnicí (88) s pomocí celkové chyby transformátoru  $I_{20}$ . Existují i jiné metody výpočtu chyb [1], ale pro náš případ je tato metoda dostačující.

### Výpočet celkové chyby transformátoru proudu

Při výpočtu využíváme znalosti měrného budícího proudění  $a_0$ , které se mění se zatížením a tím pádem se mění i celková chyba proudu.

$$I_{20} = a_0 l_m \frac{1}{N_2} \quad (86)$$

### Výpočet střední délky magnetického obvodu

$$l_m = \pi D \quad (87)$$

## Chyby proudu

Chybu proudu vypočítáme jako v předchozím případě pro všechny základní zatížení sekundárním proudem. Při výpočtu nesmíme zapomenout stanovit pro každý případ hodnotu magnetické indukce  $B_{sk}$ . Z ní posléze odvodíme všechny hodnoty daných proměnných.

### Výpočet chyby proudu

$$\varepsilon_i = -\frac{I_{20}}{I_{2n}} \cos \alpha \cdot 100 \quad (88)$$

Pokud chceme vykreslit celé pole chyb, musíme dosadit hodnoty při změně sekundárního proudu. Jako v předchozím výpočtu musíme získat hodnoty chyby proudu. Při 10%, 20%, 50%, 100% a 120% zatížení sekundárním jmenovitým proudem. Vzorec pro výpočet chyby proudu při 10 % zatížení jmenovitým sekundárním proudem  $I_{2n}$ .

### Výpočet chyby proudu při 10% zatížení sekundárním jmenovitým proudem

$$\varepsilon_i^{0,1} = -\frac{I_{20}^{0,1}}{0,1I_{2n}} \cos \alpha \cdot 100 \quad (89)$$

### Výpočet chyby úhlu

$$\delta_i^{0,1} = 3440 \frac{I_{20}}{I_{2n}} \sin \alpha \quad (90)$$

Při tomto výpočtu úhlové chyby získáváme výslednou hodnotu v úhlových minutách. A stejně jako v předchozích výpočtech provádíme výpočet při daném zatížení sekundárním proudem. Při výpočtu transformátoru se musíme držet maximálních přípustných hodnot pro danou třídu, kterou zároveň dělíme na hodnoty přípustné pro měřicí transformátory (tab. 4) a jistící transformátory (tab. 5). Pokud hodnoty převyšují povolené hodnoty pro danou třídu přesnosti je nutné provést nový výpočet anebo částečnou korekci. A by v problematické části došlo k zlepšení. Pokud se jedná o transformátory s přesností 3% a 5%. Provádíme nejčastěji změnu pomocí korekčních metod probraných v předešlé části textu.

## 5. Výpočet transformátoru proudu

Vlastní výpočet je prováděn pomocí vzorců z předchozí kapitoly. Vzorce použité v předchozí kapitole byly vloženy do souboru v Excelu. S jejich pomocí byl transformátor vypočítán. V předchozí kapitole nejsou uvedeny matematické úpravy. Tyto úpravy je možné nalézt v literatuře anebo na Internetu. Tento případ platí i pro odečítání z logaritmického grafu.

Celý postup je zmíněn v předchozí kapitole, ale za zmínku stojí problematické odečítání z logaritmických grafů. Hlavní problém je v malém formátu grafu (A5). Vlastní odečítání je nutné provádět na zvětšené kopii anebo případně na větším originále. Případně je možné provádět výpočet pomocí tabulek s danými hodnotami.

Zadané hodnoty:

Měřicí část

$$U = 25 \text{ kV} = 25000 \text{ V}$$

$$I_{1N} = 1250 \text{ A}$$

$$I_{2N} = 5 \text{ A}$$

$$n = 5$$

$$Tp = 0,5$$

$$P_n = 30 \text{ VA}$$

$$I_{thn} = 0,1083 \text{ A}$$

Jistící část

Rozsah je zadán na 15P5.

$$U = 25 \text{ kV} = 25000 \text{ V}$$

$$I_{1N} = 1250 \text{ A}$$

$$I_{2N} = 5 \text{ A}$$

$$n = 5$$

$$Tp = 15 \%$$

$$P_n = 35 \text{ VA}$$

Zvolený materiál jader transformátorů:

Et 1,3

Typ jádra:

Toroidní transformátor

Provedení:

Podpěrný závitový transformátor proudu pro vnitřní použití

Rozdíly ve výpočtu

Oba výpočty, jak měřicího, tak jistícího transformátoru, jsou shodné. Jediný rozdíl je ve volbě rozměrů transformátoru. Musíme se řídit rozměry vypočítaného měřicího transformátoru. Rozměr, který musíme dodržet je rozměr „b“, který je vyobrazen na obr. 13. Z toho vyplývá jediná možnost jak měnit průřez jádra pomocí rozměru „h“. Další rozdíl je patrný ve výpočtu chyby, kdy pro měřicí transformátor provádíme výpočet v celém rozsahu, ale pro jistící transformátor je výpočet prováděn jen pro maximální nadproudové číslo (maximální magnetickou indukci) a jmenovitou hodnotu.

## 5.1 Vypočítané hodnoty

Výpočet hodnot byl prováděn v programu Excel. Program Excel byl zvolen z důvodu přesného výpočtu a možnosti vytvoření grafu. K výpočtu je možné použít i jiný výpočetní software.

V tabulkách (8,10) nalezneme vypočítané hodnoty související se základními vypočítanými hodnotami a rozměry. V tabulkách (9,11) jsou obsaženy základní údaje související s chybou transformátoru.

### 5.1.1 Vypočítané hodnoty transformátoru – měřicí část

Počet primárních závitů	$N_1$	2	závitů
Počet sekundárních závitů	$N_2$	500	závitů
Průřezu primárního vodiče	$S_1$	0,0006019	m <sup>2</sup>
Průřez sekundárního vinutí	$S_2$	0,002	m <sup>2</sup>
Maximální magnetická indukce	$B_m$	1	T
Hodnota jmenovité indukce	$B_n$	0,2222	T
Vypočítaný průřez jádra	$S$	0,00036	m <sup>2</sup>
Výška jádra	$h$	0,018	m
Šířka jádra	$b$	0,02	m
Vnitřní průměr jádra	$D_i$	161	mm
Vnější průměr jádra	$D_e$	201	mm
Střední průměr jádra	$D$	181	mm
Výška zapouzdřeného jádra	$H$	28	mm
Šířka zapouzdřeného jádra	$B$	30	mm
Střední délka závitu sekundárního vinutí	$l_2$	123,85	mm
Odpor sekundárního vinutí (vnitřní břemeno)	$R_2$	0,5215	$\Omega$
Jmenovité břemeno ( $\cos \phi = 0,8$ )	$\cos \phi$	0,8	-

<b>Činná složka</b>	<b><math>R</math></b>	<b>0,5574</b>	<b><math>\Omega</math></b>
<b>Jalová složka</b>	<b><math>X</math></b>	<b>0,5739</b>	<b><math>\Omega</math></b>
<b>Hodnota jmenovité magnetické indukce</b>	<b><math>B_{sk}</math></b>	<b>0,1677</b>	<b>T</b>
<b>Kontrola nadproudového čísla</b>	<b><math>N_{sk}</math></b>	<b>6,6274</b>	<b>-</b>

Tab. 8 Tabulka s vypočítanými parametry měřícího transformátoru

$P$ [VA]	$I_1/I_{1n}$ [%]	$B_{max}$ [T]	$I_{20}$ [A]	$\gamma$ [°]	$\theta_c$ [°]	$a_0$ [A/m]	$\varepsilon_i$ [%]	$\delta_i$ [min]
30	120	0,201184901	0,032561146	22,72068	28,0248	27,5	-0,20881	18,66617913
	100	0,167654084	0,026640938	29,00851	28,0248	22,5	-0,26694	18,32528427
	50	0,083827042	0,018944667	10,15635	28,0248	16	-0,33018	26,06390197
	20	0,033530817	0,010656375	10,15882	28,0248	9	-0,5303	36,65066685
	10	0,016765408	0,00710425	3,875516	28,0248	6	-0,70271	48,86767475
7,5	120	0,115664925	0,02131275	19,63934	12,25573	18	-0,12909	0,339389411
	100	0,048618569	0,013805926	13,36208	12,25573	11,66	-0,14125	9,496488269
	50	0,048193719	0,013616479	13,35645	12,25573	11,5	-0,20197	18,73421404
	20	0,019277488	0,007696271	13,35624	12,25573	6,5	-0,28136	26,47234083
	10	0,009638744	0,005091379	7,072995	12,25573	4,3	-0,37073	35,02497407

Tab. 9 Tabulka s vypočítanými hodnotami chyb pro měřící transformátor



### 5.1.2 Vypočítané hodnoty transformátoru – jistící část

Počet primárních závitů	$N_1$	2	závitů
Počet sekundárních závitů	$N_2$	500	závitů
Průřezu primárního vodiče	$S_1$	0,0006019	m2
Průřez sekundárního vinutí	$S_2$	0,002	m2
Maximální magnetická indukce	$B_m$	1	T
Hodnota jmenovité indukce	$B_n$	0,2222	T
Vypočítaný průřez jádra	$S$	0,00042	m2
Výška jádra	$h$	0,021	m
Šířka jádra	$b$	0,02	m
Vnitřní průměr jádra	$D_i$	161	mm
Vnější průměr jádra	$D_e$	201	mm
Střední průměr jádra	$D$	181	mm
Výška zapouzdřeného jádra	$H$	31	mm
Šířka zapouzdřeného jádra	$B$	30	mm
Střední délka závitu sekundárního vinutí	$l_2$	129,85	mm
Odpor sekundárního vinutí (vnitřní břemeno)	$R_2$	0,5467	$\Omega$
Jmenovité břemeno ( $\cos \phi = 0,8$ )	$\cos \phi$	0,8	-
Činná složka	$R$	0,6967	$\Omega$
Jalová složka	$X$	0,7174	$\Omega$
Hodnota jmenovité magnetické indukce	$B_{sk}$	0,1688	T
Kontrola nadproudového čísla	$N_{sk}$	6,5817	-

Tab. 10 Tabulka s vypočítanými parametry jistícího transformátoru

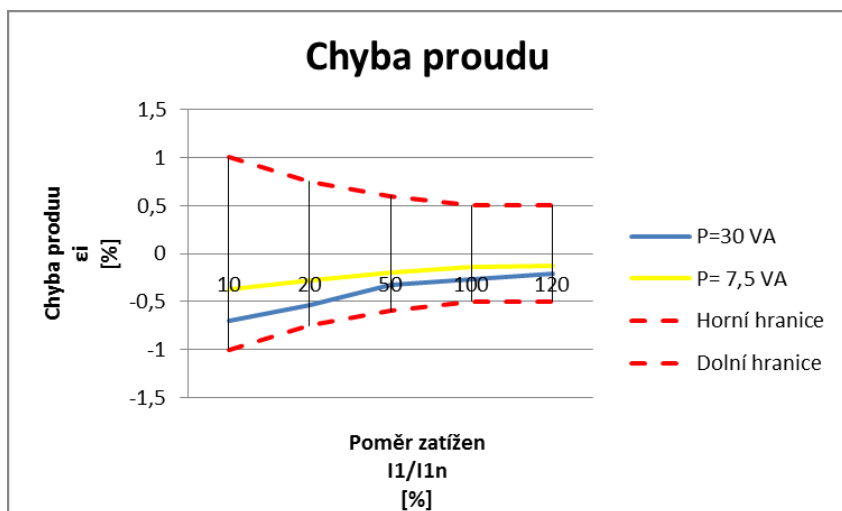
$P_n$ [VA]	CHYBA PROUDU	CHYBA ÚHLU	CELKOVÁ CHYBA
	PŘI JMENOVITÉM PRIMÁRNÍM PROUDU		PŘI JEMNOVITÉM NADPROUDU
	$\varepsilon_i$	$\delta_i$	$\varepsilon_i$
	[%]	[min]	[%]
100 %	-0,25991	18,3255	-5.383
50 %	-0,14668	12,2176	-3.1981

Tab. 11 Tabulka s vypočítanými hodnotami chyb pro jistící transformátor

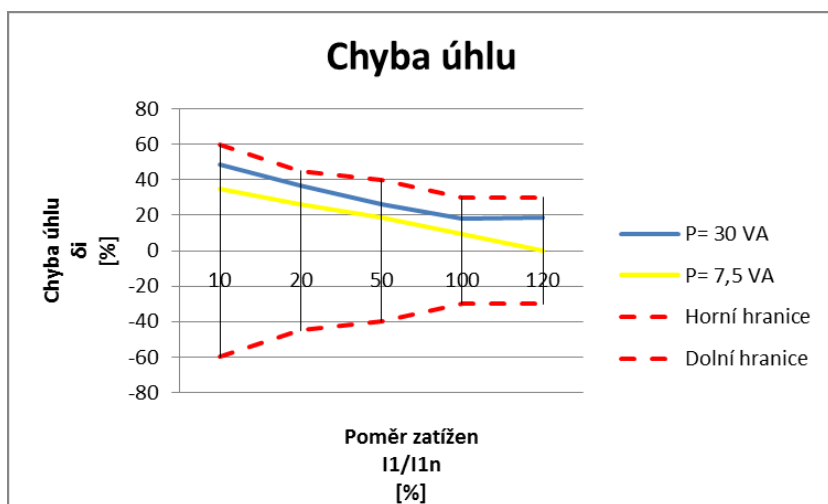
## 5.2 Výpočet pole chyb a korekce chyb

Pole chyb bylo vykresleno jen pro měřicí část transformátoru, protože pro jistící část je dostačující i tabulka s hodnotami. Pole chyb a úhlů je vykresleno pro 100%  $P_n$  a 20%  $P_n$ . Pro lepší představu je graf doplněn o maximální a minimální hranici. Tato hranice udává rozsah, v kterém se musí pohybovat chyba, aby bylo možné transformátor používat pro třídu přesnosti 0,5. V případě že chyby překročí tuto hranici je nutná korekce chyby. Ale v tomto případě korekce nebyla nutná.

### 5.2.1 Výpočet pole chyb



Obr. 23 Pole chyb proudu měřicího transformátoru



Obr. 24 Pole chyb úhlu měřicího transformátoru

## 6. Snímače proudu

V praxi se využívá i nepřímého měření účinků proudu. S rostoucím technologickým pokrokem se stále víc uplatňují nové a levnější způsoby měření proudu. Z důvodu zvýšení přesnosti odběru a snížení poruchovosti se stále více uplatňují polovodičové snímače tzv. Hallovy sondy. Ale aby to nebylo tak jednoduché je možné sledovat i značné pokroky s aplikací Rogowského cívky v nových přístrojových transformátorech. Proto je vhodné tyto dva další způsoby měření proudu rozebrat a ukázat jejich uplatnění v praxi.

### 6.1 Hallův jev

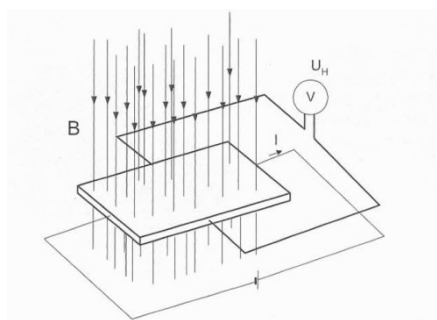
„Již v roce 1879 objevil americký fyzik Edwin Herbert Hall, že magnetické pole kolmé na elektrický proud způsobuje zvláštní jev: volné nosiče elektrického proudu jsou ve vodiči vychylovány z podélného směru a vytlačovány k okrajům. Příčinou této odchylky je elektromagnetická Lorentzova síla. Mezi okraji vodiče se tedy vytvoří rozdíl potenciálů, kolmý na směr proudu.“[4]

#### 6.1.1 Princip činnosti Hallovy sondy

„Pro měření stejnosměrného i střídavého proudu lze využít i Hallova jevu, obr. 23.

Vložíme-li destičku polovodiče do magnetického pole a necháme-li ji příčně protékat stejnosměrný proud, objeví se na opačných hranách destičky tzv. Hallovo napětí, jehož velikost je dána vztahem:“[4]

$$U_H = kIB \quad [4] \quad (91)$$



Obr. 23 Grafické znázornění zapojení Hallovy sondy

Kromě použití Hallovy sondy jako snímače proudu se s ním setkáme při měření magnetické indukce. Například při aplikacích s měřením otáček a detekci kovů.

#### 6.1.2 Průmyslově vyráběné snímače s Hallovou sondou

Na trhu se objevuje čím dál více výrobců polovodičových součástek, ze kterých je možné Hallovu sondu vyrobit. Ale domnívám se, že z hlediska této práce by bylo zbytečné a pracné získávat jednotlivé údaje pro porovnání z nepříliš důvěryhodných zdrojů. Proto jsem pátral po nějakém

profesionálním dodavateli a našel jsem odkaz na katalog s popisem od firmy Honeywell [5]. Katalog obsahuje dostatečný popis sortimentu a doplňujících dat.

#### Porovnání proudových transformátorů a Hallovy sondy

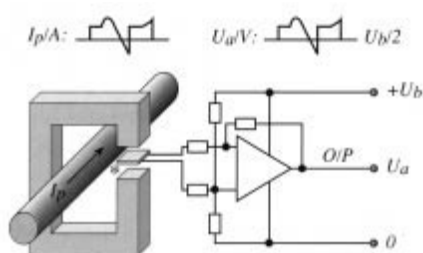
Proudové transformátory ovlivňují měřený obvod, zvyšují ztráty v měřeném obvodu a mají frekvenční omezení. Ale mezi výhody proudových transformátorů patří spolehlivost a dlouhá životnost.

Hallova sonda má také nevýhody. Je zde možnost ovlivnění cizím magnetickým polem a zatím nelze použít pro měření velmi vysokých proudů na vysokém napětí. Výhod je víc než nedostatků a proto je vhodné se tímto typem měření zabývat. Hlavní výhodu vidím v pořizovací ceně a v určité frekvenční nezávislosti.

#### Principy analogového měření proudu

Společnost Honeywell založila své výrobky na dvou principech měření:

##### a) Princip otevřené smyčky



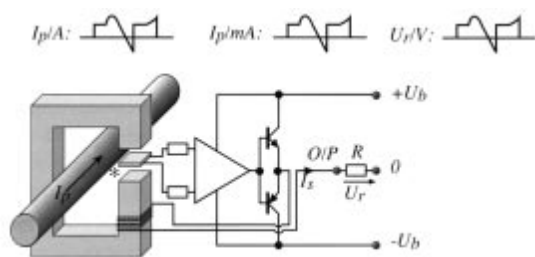
Obr. 24 Princip otevřené smyčky [5]

„Pro toto proudové čidlo je důležité, aby Hallův generátor poskytoval lineární závislost mezi magnetickým tokem a Halloým napětím. Lineární Hallův generátor LOHET (Linear Output Hall Effect Transducer / převodník s Hallovou sondou a lineárním výstupem) firmy Honeywell zcela splňuje tento požadavek. LOHET sestává z integrovaného Hallova generátoru a tří odporů na keramickém podkladu. Citlivost a teplotní kompenzace se seřizuje úpravou dvou z těchto odporů laserem. V čidle je integrován i regulátor napětí a teplotně kompenzovaný měřicí zesilovač. Výstupní napětí  $U_a$  proudového čidla je úměrné primárnímu proudu  $I_p$ .“ [5]

##### „Výhody otevřené smyčky

- nízká proudová spotřeba nezávislá na měřené hodnotě
- velmi kompaktní konstrukce bez sekundárního vinutí
- vysoká odolnost vůči přetížení“ [5]

##### b) Princip uzavřené smyčky



Obr. 25 Princip uzavřené smyčky [5]

„Magnetický tok vytvářený primárním proudem je zcela vyrovnáván opačným magnetickým tokem vinutí kolem magnetického obvodu. Každá odchylka od nulového vyvážení vede k Hallovi napětí Hallova generátoru. Elektronický obvod ihned dodá sekundární proud  $I_s$  potřebný ke kompenzaci magnetického pole. Tento proud dělený počtem závitů kolem magnetického obvodu představuje skutečný obraz primárního proudu. Při kmitočtech nad 3 a 5 kHz působení elektroniky postupně slábne. Na vyšších kmitočtech nebo při rychlých změnách proudu se proud přenáší na principu transformátoru jako v konvenčním proudovém transformátoru. Superpozice těchto dvou účinků činí z tohoto čidla zařízení měřící proud velmi přesně a velmi dynamicky. Sekundár generuje proud nezávislý na zatížení. Vložení vnějšího výkonového odporu umožňuje získat výstupní napětí širokého rozsahu.“[5]

„Výhody uzavřené smyčky

- vysoká přesnost
- velká šířka pásma
- velmi rychlá odezva
- výborná linearita
- vysoká přetížitelnost“[5]

Popis jednotlivých řad výrobků

Pro představu jsem vybral dvě výrobní řady s popisem od výrobce Honeywell. Další společnosti vyrábějí podobný sortiment, ale s nižším proudovým rozsahem a domnívám se, že není možné na trhu nalézt lepší rozsahy maximálních proudů a kvalitou provedení. Z toho důvodu byly zvoleny tyto řady.

### 6.1.3 Výrobky s využitím Hallovy sondy

Řada CSNJ



Obr. 26 Foto dvou výrobků z řady CSNJ [5]

„Hlavní rysy

- snímací rozsah až do 600 A
- přesné měření střídavých, stejnosměrných a impulzních proudů
- velice rychlá odezva
- vysoká odolnost proti přetížení
- rozšířený teplotní rozsah od -40 do +85 °C“[5]

Popis

„Tento průmyslový snímač proudu je schopen měřit proudy do 600 A v rozsahu teplot od -40 °C do +85 °C. Vyrábí se s průvlečným otvorem nebo v praporcovém provedení. Přístroj pracuje na principu snímače s uzavřenou smyčkou založeném na kompenzaci magnetického pole pomocí Hallovy sondy. Výstupem je kompenzační proud, který odpovídá primárnímu proudu v poměru počtu sekundárních závitů. Tento proud může být vložením rezistoru převeden na výstupní napětí.“[5]

„Výhody

- zvětšený měřicí rozsah v kompaktním provedení
- žádné omezení tvaru průběhu vstupního proudu
- výstupní signál přesně sleduje změny vstupního signálu
- možnosti širokého uplatnění v průmyslu“[5]

„Typické aplikace

- frekvenční měniče
- proudová ochrana
- napájecí zdroje
- obvody pro zpětnou vazbu
- robotika
- automobilový průmysl - dobíjení akumulátorů“[5]

## Technické údaje

Typové označení	Pracovní teplota [°C]	Napájecí napětí [V]	Materiál krytu	Měřicí rozsah		Nominál. výstup [mA]	Max. odpor vinutí při 70 °C [Ω]	Poč. záv.	Prim. připojení
				Nominál. [A]	Maximál. [A]				
CSNJ481 ■	-40 až +85	±12 až ±18	Polykarbonát ABS	300	600	150	25	2 000 ±1	Otvor
CSNJ481-001	-40 až +85	±12 až ±18	Polykarbonát ABS	300	600	150	25	2 000 ±1	Praporec
CSNJ481-002	0 až +70	±12 až ±18	Polykarbonát ABS	300	600	150	25	2 000 ±1	Otvor
CSNJ481-003	0 až +70	±12 až ±18	Polykarbonát ABS	300	600	150	25	2 000 ±1	Praporec

Elektrické			
Nominální proud [I <sub>n</sub> ]		300 A	
Měřicí rozsah		0 až ±600 A	
Měřicí odpor [R <sub>m</sub> ]		R <sub>m</sub> min	R <sub>m</sub> max
při napájení ±12 V [Ω]	při ±300 Ampérvátech	0	30
	při ±600 Ampérvátech	0	5
při napájení ±18 V [Ω]	při ±300 Ampérvátech	20	70
	při ±600 Ampérvátech	20	25
Nominální výst. proud		150 mA	
Poměr závitů		1/2 000	
Přesnost při +25 °C		±0,5 % I <sub>n</sub>	
Napájecí napětí		±12 V až ±18 V (±5 %)	
Izolační pevnost mezi primárním a sekundárním vinutím	7,5 kV/50 Hz/1 min		
Přesnost – dynamické vlastnosti			
Nulový proud při +25 °C		max. ±0,3 mA	
Změna nulového proudu s teplotou v rozmezí 0 °C až 70 °C		typ. ±0,3 mA, max. ±0,5 mA	
Linearita		max. ±0,1 %	
Čas odezvy		max. 0,5 ms	
dí/dt při zachování přesnosti		min. 50 A/μs	
Frekvenční rozsah		ss až 150 kHz	

Obr. 27 Parametry hodnot pro Hallovu sondu v řadě CSNJ

## Řada CSNK



Obr. 28 Výrobek z řady CSNK [5]

### Popis

„Tento průmyslový snímač proudu je schopen měřit proudy do 1200 A. V rozsahu teplot od -40°C do +85°C. Vyrábí se s průvlečným otvorem nebo v praporcovém provedení. Přístroj pracuje na principu snímače s uzavřenou smyčkou, založeném na kompenzaci magnetického pole pomocí Hallovy sondy. Výstupem je kompenzační proud, který odpovídá primárnímu proudu v poměru počtu sekundárních závitů. Tento proud může být vložením rezistoru převeden na výstupní napětí.“[5]

### „Hlavní rysy

- snímací rozsah až do 1200 A
- přesné měření střídavých, stejnosměrných a impulzních proudů
- velice rychlá odezva
- vysoká odolnost proti přetížení
- rozšířený teplotní rozsah od -40°C do +85°C“[5]

### „Výhody

- zvětšený měřicí rozsah v kompaktním provedení
- žádné omezení tvaru průběhu vstupního proudu
- výstupní signál přesně sleduje změny vstupního signálu
- možnost širokého uplatnění v průmyslu“[5]

### „Typická aplikace

- frekvenční měniče
- proudová ochrana
- napájecí zdroje
- obvody pro zpětnou vazbu
- robotika
- automobilový průmysl - dobíjení akumulátorů
- svařovací stroje“[5]



## Technické údaje

Typové označení	Pracovní teplota	Napájecí napětí	Materiál krytu	Měřicí rozsah Nominál. Maximál.		Nominál. výstup	Max. odpor vinutí při 70°C	Poč. záv.	Prim. připojení
CSNK591 ■■■	-40° až +85°	±15 až ±24V	Polykarbonát ABS	500 A	1200 A	100 mA	50 Ω	5000 ± 1	Otvor
CSNK591-001 ■■■	-40° až +85°	±15 až ±24V	Polykarbonát ABS	500 A	1200 A	100 mA	50 Ω	5000 ± 1	Praporec
CSNK591-002	0° až +70°	±15 až ±24V	Polykarbonát ABS	500 A	1200 A	100 mA	50 Ω	5000 ± 1	Otvor
CSNK591-003	0° až +70°	±15 až ±24V	Polykarbonát ABS	500 A	1200 A	100 mA	50 Ω	5000 ± 1	Praporec

Elektrické		
Nominální proud (I <sub>n</sub> ):	500 A	
Měřicí rozsah:	0 až ± 1200 A	
Měřicí odpor (R <sub>m</sub> ):	R <sub>mmin</sub>	R <sub>mmax</sub>
při napájení ± 15 V	0 Ω	50 Ω
při max ± 500 ampérových:	0 Ω	5 Ω
při max ± 1000 ampérových:	10 Ω	130 Ω
při napájení ± 24 V	10 Ω	25 Ω
při max ± 500 ampérových:		
při max ± 1200 ampérových:		
Nominální výst. proud:	100 mA	
Poměr závitů:	1/5000	
Přesnost při +25°C :	± 0.5 % I <sub>n</sub>	
Napájecí napětí :	± 15 V až ± 24 V ( ± 5 % )	
Izolační pevnost mezi primárním a sekundárním vinutím :	6 kV/50 Hz/1 min.	
EMC:	EN50082-2, EN50081-2	
Vlastní spotřeba:	22mA (24V) + výstupní proud	
Přesnost - dynamické vlastnosti		
Nulový proud při +25°C:	max. ± 0.2 mA	
Změna nulového proudu s teplotou v rozmezí 0°C až 70°C :	typ. ± 0.2 mA, max. ± 0.3 mA	
Linearita	max. ± 0.1 %	
Čas odezvy	max. 1 ms	
dI/dt při zachování přesnosti		min. 50 A/ms
Frekvenční rozsah	SS až 100 kHz	

Obr. 29 Parametry hodnot pro Hallovu sondu v řadě CSNK

### 6.1.3 Shrnutí poznatků

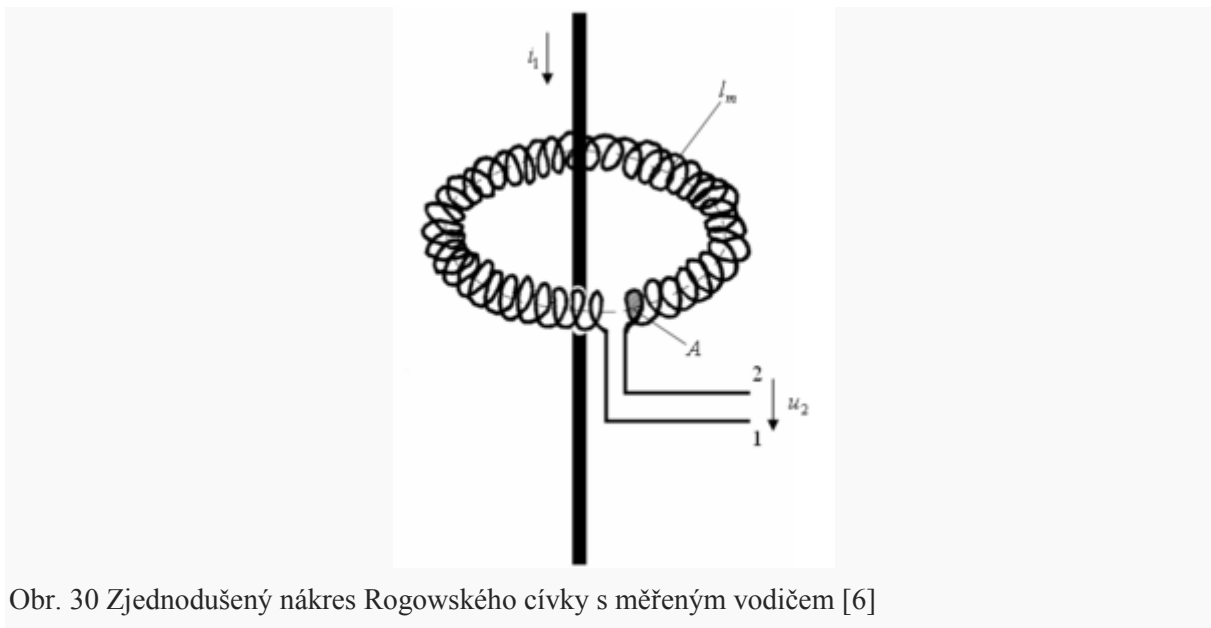
Výrobce udává měřicí rozsah do 0 až 600 A (1200A pro druhý případ). Třidu přesnosti udává v závislosti na teplotě a nominálním proudu, příliš asi nechce garantovat přesnosti měření v závislosti na rozsahu. Ze získaných parametrů je zřejmé, že rozsah by předčil MTP. Domnívám se, že pro měření v oblasti malých proudu a středních je ideální. Jediná nevýhoda je nemožnost použití jako jistího snímače pro vysoké proudy.

## 6.2 Rogowského cívka

„Základní myšlenku pro konstrukci této cívky, využívající napětí indukované střídavými proudy ve vzduchové cívce zformuloval Arthur Prince Chattock v roce 1887. Užívané pojmenování odkazuje na Waltera Rogowského, který své výzkumy publikoval v roce 1912“[6]

### 6.2.1 Princip činnosti Rogowského cívky

„Rogowského cívka (také Rogowského potenciometr) je cívka ve tvaru toroidu bez feromagnetického jádra, slouží jako součást elektrických měřicích přístrojů k měření střídavých proudů. Protože tento druh cívek nemá žádné jádro, řadí se mezi vzduchové cívky.“[6]



Obr. 30 Zjednodušený náčrt Rogowského cívky s měřeným vodičem [6]

Princip je založen na principu transformátoru ,ale jak už bylo řečeno je bez jádra. V praxi funguje jako vzduchový transformátor ve stavu naprázdno. Cívka je navinuta nejčastěji na ohebném kruhovém materiálu, který neovlivňuje měření (například plastová hadička). Jedinou podmínkou pro výrobu je že  $d \ll D$ . Průměr velikosti oka jednoho závitu „ $d$ “ musí být menší než průměr celé navinuté cívky „ $D$ “.

V minulosti se používaly k měření napětí galvanometry, dnes spíše operační zesilovače a moderní A/D převodníky. Mezi nejvýznamnější vlastnosti patří nemožnost přesycení obvodu a vysoká odolnost vůči cizím magnetickým polím. A díky skvělým vlastnostem se pohybuje chyba měření pod 1%.

Matematicky je možné popsat Ampérovým zákonem

$$\oint_l H \times dl = N_1 \times i_1 \quad [7] \quad (92)$$

Změřené hodnoty napětí musíme přepočítat na proud s použitím vzorce (93)

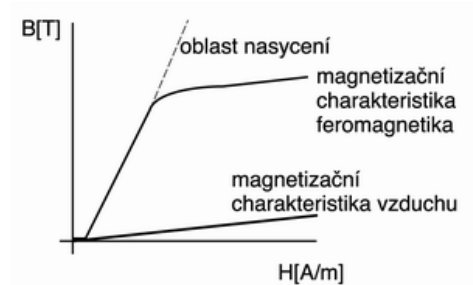
$$i_1(t) = \frac{4l}{\pi N_1 N_2 \mu_0 d^2} \Psi_2 = \frac{4l}{\pi N_1 N_2 \mu_0 d^2} \int u_2(t) dt \quad [7] \quad (93)$$

### 6.2.2 Průmyslově vyráběné snímače s Rogowského cívkou

„Zatímco se dříve pro potřeby měření proudu v elektroměrech nebo jisticích zařízeních využívaly hlavně měřicí proudové transformátory, dnes se pro potřeby velmi přesného a jemného zjišťování proudu využívá ve spojení s integrovanými obvody tzv. Rogowského cívek (Rogowski Coils).“ [8]

Jak je patrné z obr. 13 je jednoznačně zakreslena oblast nasycení. Pracovní oblasti klasického transformátoru proudu se pohybuje pod oblastí nasycení. Z důvodu nelineární charakteristiky není možné měřit počáteční malé proudy. Proto je možné měřit přesně jen v oblasti linearizované části a musíme brát také na vědomí možnost přesycení v extrémních případech.

Rogowského cívka se díky nízké magnetické indukci  $B$  ve vzduchu, pohybuje přibližně lineárně a je závislá jen na změně intenzity magnetického pole  $H$ . Proto je možné v celé pracovní oblasti možno měřit napětí, které je zatíženo jen malou chybou nelineární charakteristiky.



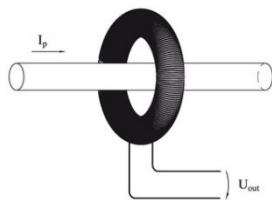
Obr. 31 Závislost magnetické indukce  $B$  na intenzitě magnetického pole  $H$  [8]

#### Měřené veličiny

V praxi využíváme Rogowského cívky k měření proudu i napětí nebo jejich kombinací.

##### a) Měření proudu pomocí Rogowského cívky

Je založen na měření indukovaného napětí ve vzduchové cívce. A na rozdíl od klasického transformátoru je lineárně závislý a nedochází k saturaci.

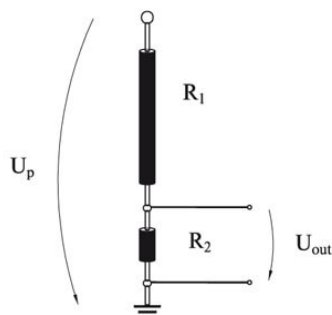


Obr. 32 Rogowského cívka v zapojení pro měření proudu [9]

##### b) Měření napětí pomocí Rogowského cívky

„Princip je založen na odporovém nebo kapacitním děliči s převodem  $10\,000\text{ V} : 1\text{ V}$ . Tyto senzory se vyznačují linearitou v celém měřicím rozsahu. Výstupní napětí je přímo úměrné vstupnímu

měřenému napětí na primáru. Tvar senzoru je speciálně navržen tak, aby minimalizoval parazitní účinky (kapacitu a indukci)“[9]



Obr. 33 Rogowského cívka v zapojení pro měření napětí [9]

c) Kombinovaný senzor s Rogowského cívkou

„Malé rozměry proudových a napěťových senzorů dovolují výrobu i kombinovaných senzorů kompaktních rozměrů. V jednom těle je obsažen proudový a napěťový senzor. Zákazník touto volbou ušetří kolem několik desítek procent nákladů na pořízení a následnou instalaci.“[9]

### 6.2.3 Výrobky s využitím Rogowského cívky

Na trhu je díky společnosti ABB dostatečný sortiment měřících přístrojů na principu Rogowského cívky. Díky prozíravosti a praktickým zkušenostem, které získává více než 15 let s aplikací a vývojem, dosáhli v oblasti způsobů konstrukcí značných úspěchů. Z hlediska vlastního provedení uvedu jen jeden základní typ, který se vyrábí ve společnosti ABB.

KECA 250 B1



Obr. 34 Fotografie čidla KECA 250 B1 [11]

Popis od společnosti ABB

„Proudový senzor je založen na principu Rogowského cívky. Cívka Rogowského je toroidní cívka bez železného jádra umístěna kolem primárního vodiče stejným způsobem jako sekundární vinutí v proudovém transformátoru. Avšak výstupní signál z cívky Rogowského není proud ale napětí. Ve všech případech se získá signál, který reprodukuje aktuální tvarový průběh primárního proudu

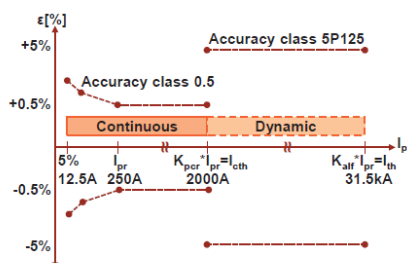
integrací vysílaného signálu. Proudové senzory jsou novým řešením pro měření proudů, pro jištění a monitorování v energetických systémech vysokého napětí.“[10]

Výhody uvedené od společnosti ABB

- „vysoká přesnost
- rozsáhlé dynamické rozpětí
- nesaturovatelný
- malé rozměry, lehká váha
- jen několik typů pro celou produktovou skupinu
- jednoduchý inženýring a logistika“[10]

Třída přesnosti

Z hlediska přesnosti splňuje v rozsahu od 250 A až do 2000 A udává výrobce třída přesnosti 0,5. Zbývající údaje je možné odečíst z obr.17 .



Obr. 35 Grafické znázornění měřicí a jistící přesnosti senzoru KECA 250 B1 [11]

#### Parametry:

Na internetu není uveden český katalog a pro překlad byl použit Překladač Google.

Ze stránek ABB jsem zvolil katalog s odkazem [11] a přeložil jsem z něj důležité parametry.

#### „Nejvyšší napětí pro zařízení a zkušebních napětí

Nejvyšší napětí pro zařízení,  $U_m$  : 0,72 kV

Napětí střídavé výdržné zkoušky na primárních svorkách: 3 kV

#### Proudový senzor, jmenovité hodnoty

Jmenovitý primární proud,  $I_{pr}$  : 250 A

Jmenovitý transformační poměr,  $K_{ra}$ : 250 A / 0,150 V při 50 Hz

250 A / 0,180 V při 60 Hz

Jmenovitý sekundární výkon,  $U_{sr}$  : 3 mV / Hz tj 150 mV při 50 Hz

nebo 180 mV při 60 Hz

Jmenovitý trvalý tepelný proud,  $I_{CTH}$  : 2000 A

Jmenovitý krátkodobý tepelný proud,  $I_{th}$  : 31,5 kA / 3 s

Jmenovitý dynamický proud  $I_{dyn}$  : 100 kA

Jmenovitá frekvence,  $f_r$ : 50/60 Hz

Jmenovitý primární proud rozšířený faktor,  $K_{PCR}$ : 8

Přesnost limitujícím faktorem,  $K_{alf}$ : 125

Třída přesnosti: 0,5 / 5P125

Jmenovitá zátěž,  $R_{br}$ : 10 M $\Omega$

Teplotní kategorie

Provoz: - 5 ° C / + 40 ° C

Doprava a skladování: -40 ° C / + 70 ° C

Kabel

Délka: 5,0m

Konektor: RJ-45 (CAT-6)

Údaje pro objednávky

KECA 250 B1 1VL5400052V0101

Rozměry a hmotnost

Číslo nákres: 1VL5300632R0101

Hmotnost: 1 kg“[11]

#### **6.2.4 Shrnutí poznatku**

Měřicí rozsah značně převyšuje měřicí rozsahy MTP i uvedené rozsahy pro Hallovu sondu. Je zajímavé, že výrobce uvádí i minimální proud 12,5A který lze měřit. Jistící rozsah je značně dostačující. Společnost ABB vyrábí i nižší proudovou řadu KECA 80, která disponuje stejně jako KECA 250 B1 značným proudovým rozsahem nad rámec normy ( $120\%I_{pr}$ ). A jako hlavní výhodu vidím možnosti využití měřicí části jako jistící s odpovídající nadproudovou oblastí.

## 7. Závěr

Z teoretického výpočtu je zřejmé, že výpočet měřicího a jistícího transformátoru je prakticky stejný. Největší obtíže při přesném výpočtu mohou nastat při odečítání z logaritmických grafů. Tyto grafy je vhodné nahradit tabulkami s přenými hodnotami. V práci byl použit starší obrázek, na kterém je patrný před náletek z epoxidu (obr. 16). V dnešní době se již tento postup nepoužívá a je nahrazen jediným odlitkem celého transformátoru. Vlastní výpočet transformátoru je však stále stejný, jediný rozdíl je v uchycení při odlévání. Výsledným kontrolním výpočtem bylo zjištěno, že transformátor proudu splňuje třídu přesnosti pro měřicí i jistící část. Proto není součástí výpočtu závitová korekce.

Srovnáním MTP a snímačů proudu bylo zjištěno, že nejvhodnějším způsobem pro měření proudů je MTP. Je to hlavně z důvodu velkého rozsahu měřitelných proudů. S postupem času je pravděpodobné že MTP budou nahrazeny snímači s Rogowského cívkou. Snímače s Rogowského cívkou mají vynikající přesnost a veliký měřicí rozsah.

Hallova sonda má schopnosti měřit i velmi malé proudy s velkou přesností. Ale spíše se uplatní pro měření frekvenčně se měnících proudů. Praktické využití je pro měření proudů motorů s frekvenčním měničem nebo je lze využít pro měření odebíraných proudů u odběratele.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOPEČEK, J., DVOŘÁK, M. *Přístrojové transformátory*. Praha: ACADEMIA, 1966.
- [2] KRÁL, J., VANĚK, J. *Elektromagnetické přístroje*. 1. vyd. Brno: VUT, 1984. Učební text vysoké školy.
- [3] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 1*. 3. vyd. Praha: ACADEMIA, 1988.
- [4] Autor neznámý. *Elektrotechnická měření 1*. vyd. 256 stran , BEN – technická literatura, 2006 , ISBN 0978-80-7300-022-6
- [5] Autor neznámý, *Honeywell – Snímače elektrického proudu s Hallovou sondou* [online]. Poslední revize: neznámá [cit. 2015–9–10].  
Dostupné z WWW: <[www.honeywell.sk/?com=documents&id=91](http://www.honeywell.sk/?com=documents&id=91)>.
- [6] Autor neznámý, *Wikipedie – Rogowského cívka* [online]. Poslední revize: 30. 9. 2013 [cit. 2015–10–10].  
Dostupné z WWW: <[https://cs.wikipedia.org/wiki/Rogowsk%C3%A9ho\\_c%C3%ADvka](https://cs.wikipedia.org/wiki/Rogowsk%C3%A9ho_c%C3%ADvka)>.
- [7] VACULÍK, V. Diplomová práce: *Snímače proudu* ,60 stran , VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2011  
Dostupné z WWW:  
<[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=37780](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=37780)>
- [8] VOJÁČEK, A., *Automatizace.hw.cz– Co je, k čemu je a jak funguje Rogowského cívka?* [online]. Poslední revize: 29.10.2007 [cit. 2015–9–10].  
Dostupné z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/co-je-k-cemu-je-jak-funguje-rogowskeho-civka>>
- [9] Autor neznámý., *ETM– Měřicí senzor nebo konvenční přístrojový transformátor?* [online]. Poslední revize: neznámá [cit. 2015–9–10].  
Dostupné z WWW: <<http://www.etm.cz/index.php/etm/518-merici-senzor-nebo-konvencni-pristrojovy-transformator>>
- [10] Autor neznámý., *ABB– Proudový senzor pro vnitřní prostředí KECA 250 B1* [online]. Poslední revize neznámá [cit. 2015–9–10].  
Dostupné z WWW:  
<<http://www.abb.cz/product/db0003db004279/c125739900636470c12573a1003e9ba7.aspx?productLanguage=cz&country=CZ>>
- [11] Autor neznámý., *ABB– KECA 250 B1 Indoor current sensor* [online]. Poslední revize 2009-07-23, katalogový list 1VLC000584. Rev.1 [cit. 2015–9–10].  
Dostupné z WWW:  
<[https://library.e.abb.com/public/d088f225a5b8c355c125762400310cff/KECA%20250%20B1\\_1VLC000584%20Rev.2%20en%202011.08.pdf](https://library.e.abb.com/public/d088f225a5b8c355c125762400310cff/KECA%20250%20B1_1VLC000584%20Rev.2%20en%202011.08.pdf)>



[12] LALENTA, L., *ENERTIS. s.r.o. – Normy na přístrojové a výkonové transformátory* [online].  
Poslední revize červen 2010 [cit. 2015–9–10].  
Dostupné z WWW: < <http://www.azvn.cz/sites/default/files/Trafa2010.pdf> >